

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

IGOR CESAR DE CARLOS ROSA

**AVANÇOS NA MANUFATURA HÍBRIDA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO FRAGMENTADA**

UBERLÂNDIA

2023

IGOR CESAR DE CARLOS ROSA

**AVANÇOS NA MANUFATURA HÍBRIDA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO FRAGMENTADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado 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

Coorientador: Prof. Dr. Henrique Coelho Fernandes

UBERLÂNDIA  
2023

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

---

R788a Rosa, Igor Cesar de Carlos, 1995-  
2023 Avanços na manufatura híbrida de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de carbono fragmentada [recurso eletrônico] / Igor Cesar de Carlos Rosa. - 2023.

Orientador: Arthur Alves Fiocchi.

Coorientador: Henrique Coelho Fernandes.

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.2023.7076>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Fiocchi, Arthur Alves, 1981-, (Orient.). II. Fernandes, Henrique Coelho, 1986-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

---

CDU: 621.01

Glória Aparecida  
Bibliotecária Documentalista - CRB-6/2047



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 637, PPGEM				
Data:	05/07/2023	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17 : 00
Matrícula do Discente:	12122EMC004				
Nome do Discente:	Igor Cesar de Carlos Rosa				
Título do Trabalho:	AVANÇOS NA MANUFATURA HÍBRIDA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO FRAGMENTADA				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	"PROJETO CONCEITUAL E PROTÓTIPO DE UMA MINIMÁQUINA MULTIPROCESSOS DE PRECISÃO CNC PARA INVESTIGAÇÃO DA USINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT 304 NO MICROTORNEAMENTO"				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Washington Martins da Silva Júnior - FEMEC/UFU; Marcos Valerio Ribeiro - UNESP; e Arthur Alves Fiocchi - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Arthur Alves Fiocchi, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Alves Fiocchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/07/2023, às 17:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/07/2023, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Valério ribeiro, Usuário Externo**, em 05/07/2023, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4600868** e o código CRC **DFD455AA**.

---

## AGRADECIMENTOS

Aos meus **PAIS**, Maria Elisa de Carlos Rosa e Júlio Cesar Rosa, pelo amor e suporte.

Ao meu **IRMÃO**, Henrique Venceslau de Carlos Rosa pela amizade, conselhos e apoio em todas as circunstâncias.

À minha **NAMORADA** e companheira, Ana Luisa Sabino Werkema, pela sua compreensão, amor e suporte em todas as decisões.

Ao meu **ORIENTADOR**, Dr. Arthur Alves Fiocchi, pela amizade, confiança, compreensão, ensinamentos e contribuição no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao meu **COORIENTADOR**, Dr. Henrique Coelho Fernandes, pelo apoio, contribuição e ensinamentos no desenvolvimento da pesquisa.

Aos **MEMBROS DA BANCA** Dr. Washington Martins da Silva Junior, Dr. Marcos Valerio Ribeiro e Dr. Marcos Massao Shimano.

Aos **FUNCIONÁRIOS** da **FEMEC**, especialmente aos **TÉCNICOS** Diego Alves, Thiago Pereira, Thiago Menezes e Alcione dos Reis pelo suporte nas realizações práticas da pesquisa.

Ao **LABORATÓRIO DE MATERIAIS E TRIBOLOGIA (LTM)** e seus integrantes, especialmente o Prof. Dr. Washington Martins da Silva Jr., Me. Paulo Lourenço Jr. e Me. Miguel Angel.

Ao **LABORATÓRIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL (LEMETRO)** e seus integrantes, especialmente a Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia.

Aos **COLEGAS** do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e FEMEC Maker, Dr. Walter dos Santos Motta Neto, Dra. Milla Caroline Gomes, Ma. Letícia Bueno do Amaral, Me. Elhadji Cheikh, Ma. Júlia Souza Abrão, Ma. Thamires Botelho e Me. Giannini Barcellos de Oliveira pela ajuda e contribuições nos desenvolvimentos das atividades práticas e troca de todo conhecimento científico.

Ao **CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO** pelo fomento à pesquisa através da bolsa de estudos concedida.

À **COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES)** através de fomento de recursos que prontificaram o desenvolvimento da pesquisa.

À **AUTODESK**, por proporcionar o livre acesso à estudantes o *software* FUSION360, que viabilizou todo o desenvolvimento de modelagem computacional da pesquisa.

À **DIGITAL SURF**, por proporcionar o livre acesso à estudantes o *software* MOUNTAINSMAP, que viabilizou todo o desenvolvimento de modelagem computacional da pesquisa.

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

## RESUMO

ROSA, I. C. C, **Avanços na manufatura híbrida de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de carbono fragmentada**. 2023. 154f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de engenharia mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2023.

O presente trabalho aborda a manufatura híbrida (MH) de compósitos poliméricos de poliácido láctico (*PLA*) com reforço de fibra de carbono fragmentada. Tema escolhido em função da crescente demanda por componentes com menor impacto ambiental, tolerâncias geométricas e dimensionais estreitas, além de maior complexidade geométrica em diferentes escalas, que estimularam o desenvolvimento e pesquisa de novas tecnologias. Neste contexto, os polímeros biodegradáveis, originados de fontes renováveis e biocompatíveis apresentam perspectiva promissora na aplicação biomédica, aeronáutica e automobilística. Assim, seu aproveitamento ou reforço pode ser realizado em conjunto com fibras de carbono fragmentadas, cuja adição esta comumente associada a modificação das propriedades térmicas e mecânicas. Enquanto isso, a aplicação de manufatura aditiva (MA) se apresenta como uma possível solução para componentes personalizados e com elevada complexidade geométrica, em que a fabricação por filamento fundido (FFF) é uma das técnicas mais utilizadas. Todavia, a aplicação desta tecnologia de fabricação apresenta limitações, especialmente nas tolerâncias dimensionais e geométricas. Além disso, em oposição a MA, o torneamento cilíndrico externo, técnica do grupo de manufatura subtrativa (MS), é capaz de obter tolerâncias mais estreitas, porém, com limitações na liberdade de projeto. Este conjunto de características opostas podem ser combinadas em um contexto híbrido, amplificando as vantagens e reduzindo limitações, todavia sua associação deve ser realizada considerando os diversos parâmetros de controle de cada uma das técnicas. De tal forma, em função do exposto, é apresentado o presente trabalho, que tem como objetivo a otimização das características dimensionais e geométricas por meio da alteração dos parâmetros de controle dos processos aditivos e subtrativos. Foram modificados os parâmetros de espessura de camada, temperatura de extrusão e temperatura da plataforma da MA, enquanto para MS foram avaliados a velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. As tolerâncias foram determinadas por um micrômetro, além de desvios macrogeométricos e microgeométricos por meio dos desvios de cilíndricidade e rugosidade, respectivamente. Finalmente, foi possível observar a redução das tolerâncias e desvios geométricos após aplicação da MS, além da redução singular da aplicação da profundidade de corte em valores proporcionais a espessura de deposição. Aliado as melhorias superficiais, foi observado que aplicação da MS e posterior a MA, quando comparado a otimização apenas por MA, apresenta tempo de manufatura reduzido. Entretanto foi constatado que a aplicação de técnicas subtrativas após a extrusão do polímero ainda apresenta limitações, principalmente na capacidade de assegurar a profundidade de corte desejada durante o torneamento de peças com elevado desvio de cilíndricidade, atributo infelizmente característico de peças fabricadas por FFF.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva; Manufatura subtrativa; Filamento Compósito; PLA; Macrogeometria; Microgeometria



ROSA, I. C. C, **Advances in hybrid manufacturing of polymer matrix composites reinforced with fragmented carbon fiber**. 2023. 154p. Dissertation (Master's) - School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, 2023.

The present work discusses Hybrid Manufacturing (MH) of polymeric composites of lactic acid polymer (PLA) with fragmented carbon fiber reinforcement. This topic was chosen due to the increasing demand for components with lower environmental impact, narrower geometric and dimensional tolerances, and higher geometric complexity in different scales, which motivated the development and research of modern technologies. In this context, biodegradable polymers, originated from renewable and biocompatible sources, present a promising perspective for biomedical, aeronautic, and automotive applications. As their use or reinforcement can be performed in conjunction with fragmented carbon fibers, addition is commonly associated with modification of thermal and mechanical properties. Meanwhile, the application of additive manufacturing (MA) presents itself as a possible solution for customizable components and with elevated geometric complexity, being Fused Filament Fabrication (FFF) one of the most used techniques. However, the application of this manufacturing technology has limitations, especially in dimensional and geometric tolerances. As opposed to MA, external cylindrical turning, a technique from the group of Subtractive Manufacture (MS), is able to obtain narrower tolerances, but with significant limitations in design freedom. These opposite characteristics can be combined in a hybrid context, amplifying the advantages and reducing limitations, but their association must be done considering the various control parameters of each technique. Thus, in accordance with the exposed, the present work is presented, which aims to optimize the dimensional and geometric characteristics by changing the control parameters of the additive and subtractive processes. In which the layer height, printing temperature and build plate temperature parameters of the MA were modified, while for MS were evaluated the cutting speed, feed rate and cutting depth. The tolerances were determined by a micrometer, as well as macrogeometric and microgeometric deviations through cylindricity and roughness deviations, respectively. Finally, it was possible to observe a significant reduction in tolerances and geometric deviations after application of the MS, in addition to the unique reduction in the application of the depth of cut in values proportional to raster width. Allied to the surface improvements, it was observed that the application of the MS and after the MA, when compared to the optimization by MA alone, presents lower manufacturing time. However, it was found that applying subtractive techniques after polymer extrusion still has limitations, the main one being the difficulty in ensuring the desired depth of cut during turning of parts with high cylindricity deviation, an attribute unfortunately characteristic of parts manufactured by FFF.

**Keywords:** Additive manufacturing; Subtractive manufacturing; Filament Composite; PLA; Macrogeometry; Microgeometry

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Módulo de armazenamento em função do tempo à 150 °C (a) e 190 °C (b) para o PLA com baixo MW e seus compósitos, além de 150 °C (c) e 190 °C (d) para o PLA com elevado MW e seus compósitos .....	24
Figura 2.2 - Módulo de Young em função da temperatura para polímeros amorfos .....	25
Figura 2.3 - Coeficiente de expansão térmica linear em função dos polímeros tradicionalmente comercializados para MA .....	27
Figura 2.4 - Coeficiente de atrito ( $\mu$ ) em função do tempo e parâmetros aditivos de fabricação. ....	28
Figura 2.5 - Patentes publicadas em função do ano e empresa. ....	31
Figura 2.6 - Representação dos princípios de processamento de materiais poliméricos para manufatura aditiva em função das características de processamento.....	32
Figura 2.7 - Representação esquemática do processo e principais componentes presentes na técnica de manufatura <i>LMD</i> .....	33
Figura 2.8 - Representação esquemática da FFF, apresentando os principais componentes e evolução do estado do material no processamento .....	35
Figura 2.9 - Representação esquemática do processamento SLS e os principais equipamentos utilizados para aplicação da técnica. ....	36
Figura 2.10 - Resistência à tração do PLA, PLA com fibra de carbono (FC) e PLA com fibra de carbono tratado (FC modificado) (a) e resistência à flexão do PLA, PLA com fibra de carbono (FC) e PLA com fibra de carbono tratado (FC modificado) (b) em função do tempo para uma deformação constante. ....	40
Figura 2.11 - Representação esquemática das três principais orientações de construção, <i>upright</i> , <i>on-edge</i> e <i>flat</i> .....	42
Figura 2.12 - Representação esquemática dos parâmetros utilizados na FFF, espessura de deposição, espessura de deposição, espessura de contorno e ângulo de deposição. ....	42
Figura 2.13 - Representação esquemática da distância entre filamentos positiva ( $g>0$ ), nula ( $g=0$ ) e negativa ( $g<0$ ).....	43
Figura 2.14 - Representação esquemática da espessura de deposição, espessura de camada e vazios originados dessa interação entre os parâmetros escolhidos .....	44
Figura 2.15 - Exemplo de preenchimento em (a) e (d) origami, (b) e (e) grade, e (c) e (f) hexagonal .....	45
Figura 2.16 - Exemplos de cubos fabricados com (a) estrutura similar ao osso trabecular, e (b) preenchimento hexagonal .....	45
Figura 2.17 - Demonstração do incremento da porcentagem de preenchimento triangular para quatro peças distintas, sendo que todos demais parâmetros foram mantidos constantes .....	46
Figura 2.18 - Componentes expostos a ensaios de tração, apresentando preenchimento constante (a), (b) e (c) e preenchimento variável (c), (d) e (f) .....	47
Figura 2.19 - Viscosidade complexa em uma escala logarítmica em função do inverso do tempo para PLA extrudado a diferentes temperaturas .....	48

Figura 2.20 - Componente fabricado por FFF para exemplificar a complexidade das texturas geradas pela técnica.....	50
Figura 2.21 - Representação das principais etapas utilizadas para desenvolvimento de um prótese, (a) modelo CAD contendo o defeito a ser analisado, (b) distribuição das regiões de impressão, verde, azul e vermelho como caminho do PLC, pluronic f-127 e hidrogel, respectivamente (c) processo de ma, (d) fotografia da peça utilizada para reparo da mandíbula após cultura em osteogênica por 28 dias, (e) diferenciação osteogênica confirmada pela presença de cálcio .	51
Figura 2.22 - Asa de aeromodelo fabricado por manufatura aditiva em corte.....	52
Figura 2.23 - Protótipo de coletor de admissão fabricado para avaliação empírica do escoamento interno dos fluídos.....	53
Figura 2.24 - Representação dos defeitos de delaminação ocasionado devido ao processo de furação de um polímero compósito. (a) <i>peel-up</i> e (b) <i>push-out</i> .....	56
Figura 2.25 - Retificação de compósito polimérico com fibras de carbono com fibras paralelas a direção de corte (a) e fibras perpendiculares a direção de corte (b) .....	57
Figura 2.26 - Formação do cavaco em um polímero sobre corte ortogonal em diferentes profundidades de corte (ap) e as representações esquemáticas da deformação física ocasionada no processo ...	60
Figura 2.27 - Representação esquemática de estação de trabalho de uma máquina híbrida associando FFF e fresamento.....	68
Figura 2.28 - Representação esquemática da manufatura híbrida (MH) de um componente por meio da aplicação do processamento aditivo e subtrativo em etapas concomitantes .....	70
Figura 2.29 - Representação esquemática da subtração de material de peças fabricadas por meio da FFF do material PEEK (a) e PEEK com fibra de carbono fragmentada (b) .....	72
Figura 2.30 - Força de corte para poliamida12 (PA12) e poliamida12 com fibra de carbono (PA12CF) para diversos parâmetros de corte.....	73
Figura 2.31 - Comparação da manufatura híbrida (MH) com diferentes graus de liberdade (DOF) e operações aditivas e subtrativas. os traços vermelhos ( <i>pn</i> ) indicam as seções com alteração de processos. as regiões marcadas em azul foram processadas por MA e MS, enquanto as cinzas representam as regiões em que não foi possível acessar com a ferramenta de corte para processamento o subtrativo.....	75
Figura.3.1 - Máquina de extrusão polimérica de três eixos cartesianos CL2 PRO+® modificada com botão de acionamento das luzes e de parada de emergência em evidência.....	79
Figura.3.2 - Saias utilizadas para ajuste da mesa de impressão .....	80
Figura 3.3 - Desenho técnico do corpo de prova tipo A cotado em [mm] .....	82
Figura.3.4 - Desenho técnico do corpo de prova tipo B cotado em [mm] .....	82
Figura 3.5 - Representação gráfica da posição (eixo X; eixo Y) e ordem de fabricação dos corpos de prova tipo A.....	85
Figura 3.6 - Representação gráfica da posição (eixo X; eixo Y) e ordem de fabricação dos corpos de prova tipo B .....	86
Figura 3.7 - Invólucro utilizado para armazenamento e identificação dos corpos de prova tipo A e tipo B. ....	88

Figura 3.8 - Minitorno CNC utilizado para ensaios de torneamento cilíndrico externo .....	89
Figura 3.9 - 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) .....	90
Figura 3.10 - Suporte de ferramenta SDACR 1212K 07-S e ferramenta de metal duro DCGX 0702 04 Al 1105 .....	90
Figura 3.11 - Mandril de fixação utilizado nas operações de subtração e medição dos desvios macrogeométricos dos corpos de prova .....	91
Figura 3.12 - Bucha de fixação utilizado nas operações de subtração e medição dos desvios macrogeométricos dos corpos de prova .....	91
Figura 3.13 - Montagem do mandril de fixação, corpo de prova (cp) e bucha de fixação. ....	92
Figura 3.14 - Montagem do sistema de ensaio do torneamento cilíndrico externo, utilizando o relógio comparador, base magnética, mandril de fixação, corpo de prova, bucha de fixação e minitorno cnc .....	92
Figura 3.15 - Formação de cavaco que ficou em contato com a peça após usinagem, sendo utilizado o corpo de prova com designação SVc 20 – II para exemplificar o evento. ....	95
Figura 3.16 - Adição da identificação nos corpos de prova após ensaios de usinagem. ....	95
Figura 3.17 - Exemplo de identificação dos cavacos gerados no processamento subtrativo .....	96
Figura 3.18 - Montagem do corpo de prova na Talyrond 131 da Taylor Hobson® (MMDF) utilizando uma ponta de rubi de 2 mm de diâmetro. ....	97
Figura 3.19 - Conjunto montado de mesa de desempenho, suporte, micrômetro e corpo de prova. ....	98
Figura 3.20 - montagem de corpos de prova para avaliação de rugosidade e perfilometria no interferômetro LASER UBM® .....	101
Figura 3.21 - Regiões de medição de rugosidade e perfilometria nos corpos de prova .....	102
Figura 3.22 - Suporte inclinável utilizado para avaliação da ferramenta no MEV .....	103
Figura 3.23 - Fluxograma das principais etapas do material e métodos, sendo utilizado a cor laranja para representar a seção de MA, azul para seção de MS e roxo para de ensaios não destrutivos. ....	106
Figura 4.1 - Fluxo das etapas de apresentação dos resultados e discussões da manufatura aditiva, subtrativa e híbrida. ....	107
Figura 4.2 - Diâmetro externo dos corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE) em comparação com o diâmetro de projeto, representado em laranja. ....	108
Figura 4.3 - Desvio do diâmetro externo dos corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE). ....	109
Figura 4.4 - Cilindricidade (CLYt) para corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE). ....	110
Figura 4.6 - Média das variações de relevo microgeométricos (Ra), desvio padrão da distribuição da altura (Rq) e altura total do perfil de rugosidade (Rt) para corpos de prova processados alterando os	

parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE). .....	111
Figura 4.7 - Distribuição estatística descritiva da assimetria (Rsk) e curtose (Rku) para corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE). .....	112
Figura 4.8 - Aspectos tridimensionais de média aritmética da altura dos picos (Sa) e altura média elevada ao quadrado (Sq) para corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE). .....	113
Figura 4.9 - Diâmetro externo dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte (Vc), avanço (f) e profundidade de corte (ap), sendo o diâmetro de projeto representado pela linha em laranja. ....	114
Figura 4.10 - Cilindricidade (CLYt) dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte (Vc), avanço (f) e profundidade de corte (ap). ....	115
Figura 4.11 - Representação dos desvios de cilindridade da terceira replica do corpo de prova fabricado com profundidade de corte de 0,02 mm, velocidade de corte de 35 m/min, e avanço de 0,10 mm/volta. ....	116
Figura 4.13 - Média das variações de relevo microgeométricos (Ra), desvio padrão da distribuição da altura (Rq) e altura total do perfil de rugosidade (Rt) dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte (Vc), avanço (f) e profundidade de corte (ap). ....	117
Figura 4.14 - Representação gráfica do efeito da profundidade de corte na rugosidade final do cp .....	118
Figura 4.15 - Distribuição estatística descritiva da assimetria (Rsk) e curtose (Rku) dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte (Vc), avanço (f) e profundidade de corte (ap). ....	119
Figura 4.16 - Aspectos tridimensionais de média aritmética da altura dos picos (Sa) e altura média elevada ao quadrado (Sq) dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte (Vc), avanço (f) e profundidade de corte (ap). ....	120
Figura 4.17- Força de corte dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte (Vc), avanço (f) e profundidade de corte (ap). ....	121
Figura 4.18 - Imagens coletadas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) das superfícies de saída antes (a) e depois da usinagem (c), além da principal de folga antes (b) e depois da usinagem (d) da ferramenta DCGX 070204 Al 1105. ....	122
Figura 4.19 - Comparativo dos aspectos superficial tridimensional, superficial bidimensional e tempo necessário para fabricação dos corpos de prova em função da alteração da espessura de camada (EC) e avanço (f). ....	128

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 2.1 - Principais materiais processados por MA, subdividido por categorias (Bourell <i>et al.</i> , 2017). .....	38
Quadro 2.2 - Propriedades do filamento PLA puro (adaptado de Farah <i>et al.</i> , 2016) .....	39
Quadro 2.4 - Lista de condições e respectivos parâmetros utilizados na usinagem de poliamida e poliamida com fibra de carbono (Ferreira <i>et al.</i> , 2020) .....	73
Quadro 3.1 - Informações do filamento de fibra de carbono fragmentado fornecido pelo fabricante (GTMAX3D®).....	81
Quadro 3.2 - Principais parâmetros aditivos utilizados na impressão dos corpos de prova. ....	83
Quadro 3.3 - Designação dos corpo de prova e códigos utilizados na fabricação dos corpos de prova por MS para os parâmetros de velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ). 93	
Quadro 3.4 - Equações aplicadas para cálculo das variáveis utilizadas no cálculo de incerteza .....	100
Quadro 3.5 - Resumo geral dos parâmetros aditivos e subtrativos de entrada e saída aplicados na pesquisa .....	105

## SÍMBOLOS

$\mu$	Coeficiente de atrito
ap	Profundidade de corte
div.	divisão
f	Avanço
fz	Avanço por dente
g/cm <sup>2</sup>	Gramas por centímetro ao quadrado
G'	Módulo de armazenamento
GPa	Giga Pascal
Hz	Hertz
kNm/g	Quilo Newton metro por grama
KPa	Kilo Pascal
KPa*s	Kilo Pascal segundos
min	Minutos
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
Nm/g	Newton metro por grama
Pa*s	Viscosidade complexa
RPM	Rotações por minuto
s	Segundos
T <sub>g</sub>	Temperatura de transição vítrea
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade de avanço
$\alpha$	Coeficiente de expansão térmica

## ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
AEC	Antes da era comum
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
BJT	Jato de aglutinante
CBN	Nitreto de boro cúbico
CP	Corpo de Prova
CPE	Polietileno clorado
DED	Deposição por energia direcionada
DOF	Graus de liberdade
<i>EBM</i>	<i>Electron beam melting</i>
EC	Espessura de camada
FC	Fibra de Carbono
FDM	<i>Fused depostion modeling</i>
FFF	Fabricação por filamento fundido
HAMP	Processos híbridos de manufatura aditiva
HASMP	Processos híbridos de manufatura aditiva e subtrativa
HATMP	Processos híbridos de manufatura aditiva e de transformação
HM	Manufatura híbrida
HSS	Aço rápido
HSTMP	Processos híbridos de manufatura de subtração e transformação
HTMP	Processos híbridos de manufatura de transformação
HUSMP	Processos híbridos de manufatura de união e subtração
ISO	<i>International organization for standardization</i>
LAZER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LEPU	Laboratório de ensino e pesquisa em usinagem
<i>LMD</i>	<i>Laser melting deposition</i>
LPM	Laboratório de projetos mecânicos



MA	Manufatura aditiva
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MEX	Extrusão de material
MJT	Jateamento de material
MW	Peso molecular
MWD	Distribuição do peso molecular
PA	Poliamida
PBF	Fusão em leito de pó
PC	Policarbonato
PCD	Diamante policristalino
PEEK	Poliéterétercetona
PEI	Polieterimida
PETG	Poliétileno tereftalato glicol
PLA	Ácido polilático
PP	Polipropileno
RPM	Rotações por minuto
SHL	Laminação em folha
<i>SLM</i>	<i>Select laser melting</i>
<i>SLS</i>	<i>Select laser sintering</i>
SM	Manufatura subtrativa
TB	Temperatura da plataforma
TE	Temperatura de extrusão
TP	Termoplástico
TPU	Poliuretano termoplástico
UFU	Universidade federal de Uberlândia
VPP	Fotopolimerização em cuba

**SUMÁRIO**

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2</b>	<b>JUSTIFICATIVAS.....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>POLÍMEROS E COMPÓSITOS POLIMÉRICOS .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>MANUFATURA ADITIVA.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3</b>	<b>MANUFATURA SUBTRATIVA.....</b>	<b>54</b>
<b>2.4</b>	<b>MANUFATURA HÍBRIDA .....</b>	<b>65</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>78</b>
<b>3.1</b>	<b>FABRICAÇÃO POR MA.....</b>	<b>78</b>
<b>3.2</b>	<b>FABRICAÇÃO POR MS .....</b>	<b>88</b>
<b>3.3</b>	<b>ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....</b>	<b>96</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>107</b>
<b>4.1</b>	<b>MANUFATURA ADITIVA.....</b>	<b>108</b>
<b>4.2</b>	<b>MANUFATURA SUBTRATIVA.....</b>	<b>113</b>
<b>4.3</b>	<b>MANUFATURA HÍBRIDA .....</b>	<b>123</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>129</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>132</b>

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO

A constante evolução dos produtos do mercado é acompanhada pela necessidade de produção de componentes com tolerâncias geométricas e dimensionais mais estreitas, além da capacidade de fabricação de componentes com maior complexidade geométrica. Essa demanda exige evolução constante das tecnologias de fabricação utilizadas na academia e indústria. Nesse sentido, diversas tecnologias ganharam espaço em função desses requisitos, dentre elas, a extrusão de material (MEX) se destaca pela elevada liberdade geométrica e capacidade de operação em diversos polímeros.

As tecnologias MEX, da manufatura aditiva (MA), ganharam pluralidade tecnológica e maior disseminação de exploração a partir do ano de 2014 com o término da proteção industrial da patente da tecnologia *Fused Filament Modeling (FDM®)*, marca e tecnologia protegida pela empresa Stratasys®. Após esse período de diversificação, diversas empresas entraram no mercado de MA, reduzindo os valores associados as impressoras e produtos de consumo. Essa evolução modificou significativamente a aplicação dessa tecnologia em diversos setores, dentre eles, os principais foram automotivo, aeroespacial e biomédico.

O aumento da aplicabilidade das tecnologias MEX pode ser associado a elevada liberdade geométrica e menor custo em relação as metodologias tradicionais, porém ainda existem significativas limitações quanto a capacidade de alcançar a resistência mecânica, tolerâncias dimensionais e geométricas de componentes injetados em moldes permanentes. A limitação quanto a resistência mecânica pode ser solucionada por meio da utilização de materiais compósitos, como termoplásticos reforçados com fibras fragmentadas e contínuas, que além de aumentar a resistência mecânica, podem otimizar as propriedades elétricas, térmicas e o livre caminho médio entre fibras do componente.

As limitações das tolerâncias geométricas e dimensionais dos componentes produzidos por MEX podem ser reduzidas por meio da aplicação da manufatura subtrativa (MS). A adição de metodologias subtrativas ao processamento é capaz de otimizar as características superficiais, porém, caso a fabricação seja aplicada em múltiplas máquinas, a subtração de material só poderá ser realizada em regiões acessíveis pela ferramenta de corte, conforme limitações tradicionalmente associadas MS, inviabilizando a aplicação em conjunto de tolerâncias estreitas em superfícies internas ou de elevada liberdade geométrica. Nesse sentido,

uma possível solução para essa deficiência é a hibridização do ciclo de fabricação, procedimento realizado com o intuito de gerar um equipamento com capacidade de produção superior aos processos individuais aplicados em múltiplas etapas. A aplicação de processos híbridos é capaz de fabricar componentes com tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas, associando correção de forma e acabamento, além de apresentar poucas limitações geométricas.

A manufatura híbrida (MH) pode solucionar diversos problemas de fabricação e, dentre eles, se destacam a capacidade de fabricar geometrias internas ou complexas aliada ao desperdício de material reduzido, enquanto produz tolerâncias geométricas e dimensionais mais estreitas, porém com maior grau de complexidade associado ao processamento. Essa última característica é intensificada pela quantidade de parâmetros de controle utilizados na fabricação, principalmente na MH de compósitos em que as estratégias de deposição da fibra podem alterar a resposta do material no processamento. Em função dessas adversidades, as pesquisas sobre a MH de compósitos aumentaram significativamente na última década, porém ainda existem muitos temas a serem abordados, principalmente na avaliação dos parâmetros híbridos do processo.

## 1.1 OBJETIVOS

Neste subtópico do primeiro capítulo estão elucidados os objetivos da pesquisa.

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral a manufatura aditiva do poliláctico (PLA) com fibra de carbono curta em conjunto à manufatura subtrativa para redução das tolerâncias dimensionais e geométricas, sendo analisado os efeitos dos parâmetros aditivos e subtrativos, além da aplicação de ambos em um contexto híbrido.

### 1.1.2 Objetivos específicos.

- Determinação das tolerâncias dimensionais e geométricas (rugosidade, cilindridade) dos processos aditivo por extrusão de material e subtrativo de torneamento cilíndrico externo no contexto da manufatura híbrida;

- Determinar as vantagens e limitações da manufatura aditiva, manufatura subtrativa e aplicação em conjunto no contexto híbrido para compósitos poliméricos;
- Realizar análise crítica da cadeia da manufatura por adição e subtração para embasar o desenvolvimento dos processos, equipamentos e *softwares* no encadeamento e sincronismo das etapas de fabricação em um mesmo equipamento.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

O presente trabalho foi realizado em função da quantidade reduzida de pesquisas sobre a manufatura em múltiplas etapas, especialmente em uma abordagem híbrida do processo. As investigações e conceitos avaliados neste trabalho são um passo inicial para concepção de maquinários, procedimentos experimentais e projeto de componentes com tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas aliado ao baixo consumo de matéria-prima.

## CAPÍTULO II

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura, contextualizada à pesquisa no que tange ao estado da técnica da manufatura aditiva (MA), manufatura subtrativa (MS) e a manufatura híbrida (MH) de polímeros e seus compósitos, além das técnicas de caracterização de material e das tolerâncias dimensionais e geométricas.

#### 2.1 POLÍMEROS E COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Polímeros derivados de plantas ou animais, comumente referenciados como naturais, começaram a ser utilizados a vários séculos Antes da Era Comum (AEC). Os principais exemplos desses materiais incluem a madeira, borracha, algodão, lã, couro e seda (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Enquanto isso, as fibras de celulose em uma matriz de lignina, mais precisamente, a madeira, se destaca como um dos primeiros compósitos poliméricos naturais utilizados pelo homem (GEORGE *et al.*, 2020).

Em função do histórico de utilização desses materiais, é difícil imaginar um mundo sem polímeros, porém a aplicação em larga escala só foi possível após a segunda guerra mundial (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Desse modo, os principais motivos foram a criação de novas tecnologias para síntese dos polímeros, novas demandas de mercado (GEYER *et al.*, 2017; TAN *et al.*, 2020; CORRAL *et al.*, 2021), além das novas metodologias de processamento que ampliaram a aplicação desses materiais (TAN *et al.*, 2020; CORRAL *et al.*, 2021)

Dentre as novas metodologias de fabricação, a MA se destaca como uma das mais recentes (MOHAMED *et al.*, 2015), e mais promissoras (CORRAL *et al.*, 2021), já que possibilitam fabricação com uma grande variedade de polímeros e compósitos poliméricos, além da expressiva liberdade geométrica de projeto (TAN *et al.*, 2020).

##### 2.1.1 Propriedades Químicas

As características químicas de um polímero são essenciais na definição da aplicação do material, tendo em vista que esse conjunto de características influencia diretamente nas propriedades mecânicas, elétricas e tribológicas, além de definir a complexidade de produção

desse composto. Dentre as diversas propriedades químicas de um composto, as principais são o peso molecular (GAO *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2020) e a temperatura de transição vítrea (QIAN *et al.*, 2019).

- *Peso Molecular*

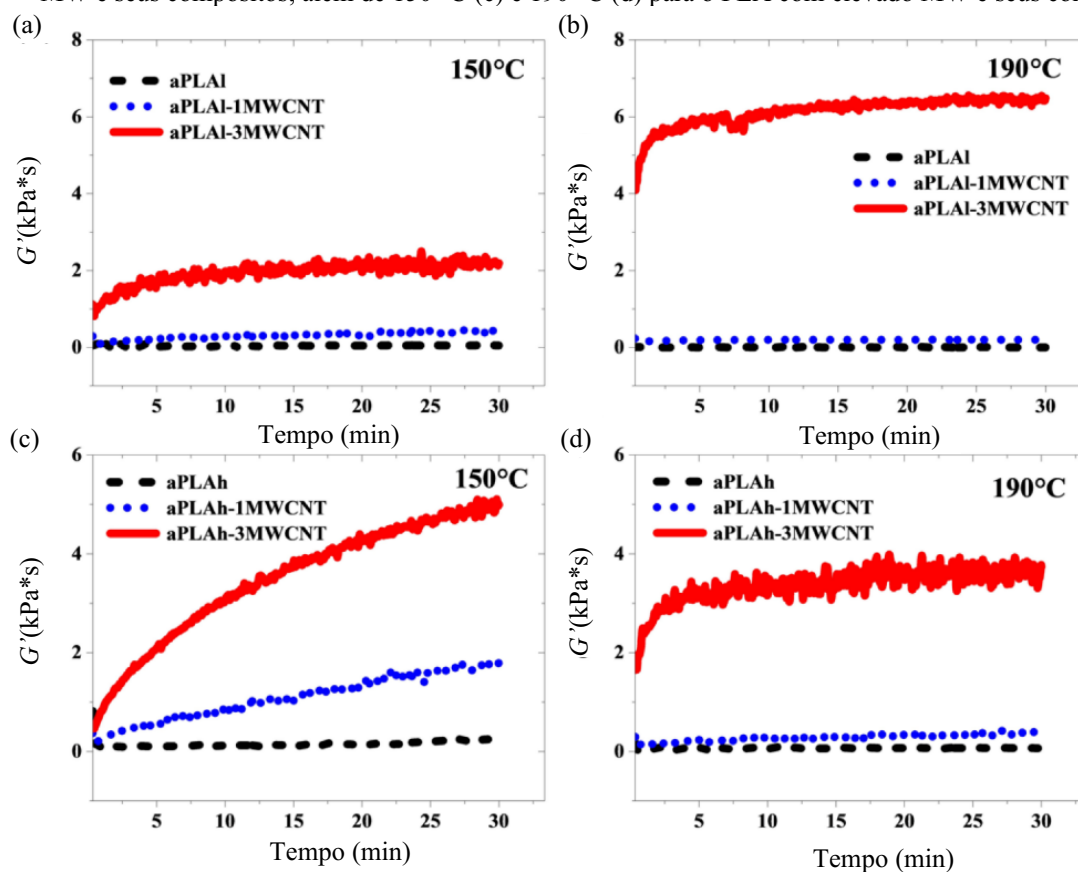
O peso molecular (MW) e sua distribuição (MWD) são parâmetros importantes no controle das propriedades mecânicas e de processamento dos polímeros (GAO *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2020), principalmente em relação a variação do peso molecular, em que pode ocorrer de forma independente da alteração química do material e, em alguns casos, modificando as propriedades mecânicas do material no processo (CHENG *et al.*, 2021).

Dessarte, foi proposto em 1936, por Douglas e Stoops (1936), que a resistência a tração de acetato de policloreto (*vinyl chloride-vinyl acetate copolymers*) poderia ser expressa em função do inverso do peso molecular. Essa relação empírica foi posteriormente confirmada e estendida para amostras polidispersas por Flory (1945) e, posteriormente, ampliada a diversos materiais, como por exemplo o PLA, conforme apresentado por Kilic *et al.*, (2020) e Mohammadi *et al.*, (2023).

Além disso, o MW pode alterar a evolução das propriedades mecânicas dos polímeros a elevadas temperaturas, em que para o caso específico do PLA, essas características são significativas para a viscosidade, resistência a tração (KILIC *et al.*, 2020) e módulo de armazenamento (*storage módulos – G'*) (MOHAMMADI *et al.*, 2023), parâmetro esse utilizado para descrever a quantidade de energia armazenada após exposição do material a carga cíclicas. Vê-se a evolução do módulo de armazenamento para o PLA de baixo e elevado MW apresentado na Figura 2.1, além dos efeitos da adição de nanotubos de carbono, descritos como aPLA1-1MWCNT e aPLA1-3MWCNT, que representam o PLA com 1 % e 3 % de participação em peso de nano tubo, respectivamente.

Ademais, é possível perceber que utilização de um polímero ou matriz polimérica de elevado MW aumentou os módulo de armazenamento a 150 °C, enquanto reduziu na aplicação à 190 °C. Além disso, com exceção da aplicação do PLA com alto MW à 150 °C, a aplicação de nano tubos de carbono se tornou significativa apenas para implementações superiores a 3 % do peso total.

Figura 2.1 - Módulo de armazenamento em função do tempo à 150 °C (a) e 190 °C (b) para o PLA com baixo MW e seus compósitos, além de 150 °C (c) e 190 °C (d) para o PLA com elevado MW e seus compósitos



Fonte: Mohammadi *et al.*, (2023)

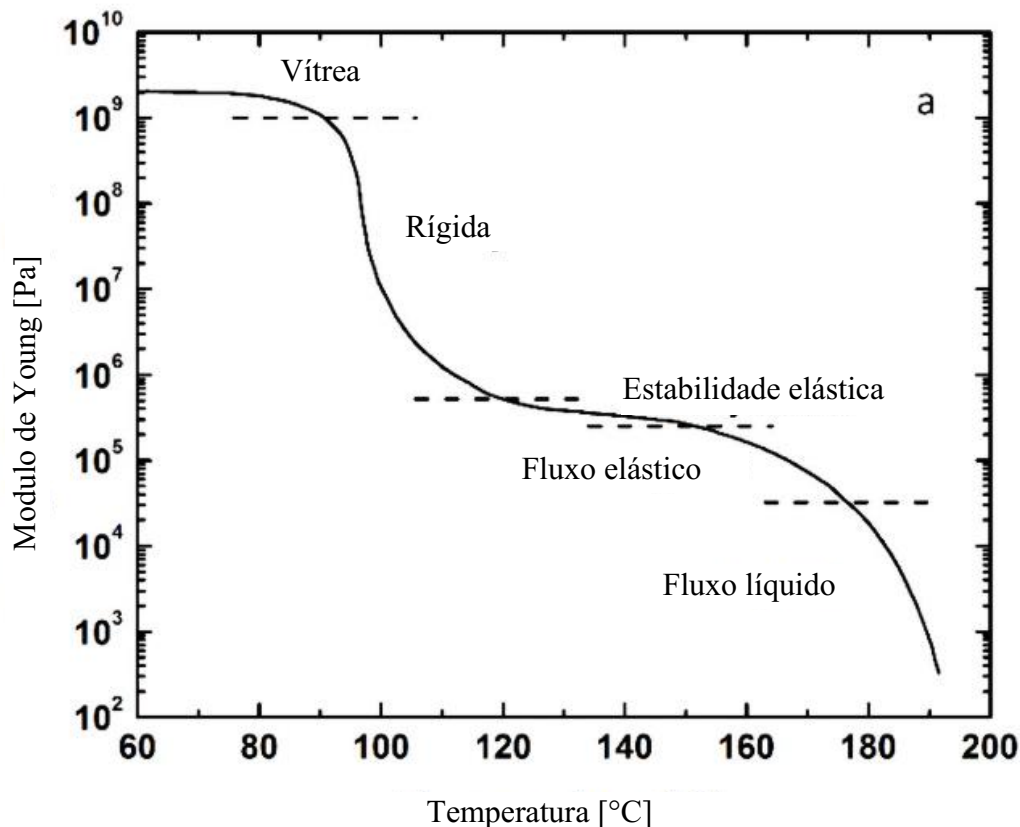
- *Transição Vítre*

O conceito da transição vítrea ( $T_g$ ) é um tema complexo, sendo possível encontrar diversos conceitos aplicáveis, porém os principais destes a definem em função do movimento cooperativo dos átomos (QIAN *et al.*, 2019). Uma abordagem interessante do tema foi realizada por Adam e Gibbs (1965), que propuseram que, para um material suficientemente resfriado, a descontração estrutural só irá acontecer caso um número específico de partículas se reorganize de forma coletiva.

A transição vítrea, de tal forma, pode ser entendida de forma generalizada como um indicador das propriedades mecânicas dos polímeros para uma temperatura (QIAN *et al.*, 2019). Na Figura 2.2 é apresentada uma representação esquemática da dependência do módulo de Young em função da temperatura em polímeros amorfos, sendo que o PLA pode ser caracterizado pelo mesmo comportamento apresentado (KILIC *et al.*, 2020).



Figura 2.2 - Módulo de Young em função da temperatura para polímeros amorfos



Fonte: Quian *et al.*, (2019)

O comportamento viscoelástico apresentado na Figura 2.2 pode ser subdividido em cinco regiões: fluxo líquido, fluxo elástico, estabilização elástica, rígida e vítrea (QUIAN *et al.*, 2019). Assim, o regime de transição é caracterizado pela capacidade de modificação do módulo de Young em várias ordens de grandeza para pequenas alterações da temperatura, enquanto grandes alterações da temperatura não modificam significativamente o módulo de Young no regime de estabilização elástica (MOHAMMADI *et al.*, 2023). Porém, o aumento da temperatura provoca nova alteração, sendo possível novamente notar expressivo aumento da temperatura nas regiões fluxo elástico e fluxo líquido (QUIAN *et al.*, 2019).

### 2.1.2 Propriedades Físicas

O controle das propriedades físicas de um polímero é essencial para sua produção e aplicação de forma lucrativa (ÇEVIK; KAM, 2020), sendo os atributos físicos do material dependentes da composição e estrutura química, além do seu histórico de processamento e condições ambientais de aplicação (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Dentre os atributos

físicos, os principais são o coeficiente de expansão térmica (ÇEVIK; KAM, 2020), coeficiente de atrito (JOZWIK *et al.*, 2019) e condutividade térmica (GARCIA *et al.*, 2021).

- *Coeficiente de expansão térmica*

A alteração volumétrica em função da temperatura é um comportamento encontrado em todos os materiais conhecidos, e esse fenômeno é comumente referenciado como expansão térmica. Desse modo, a relação entre a modificação da temperatura e volume denominada como coeficiente de expansão térmica (CALLISTER; RETHWISCH, 2016), é descrito na equação 2.1.

$$\frac{V_f - V_0}{V_0} = \alpha_v(T_f - T_0)$$

Na equação (2.1) é apresentada a aplicação do coeficiente de expansão térmica, sendo:  $V_f$  Volume final,  $V_0$  Volume inicial,  $T_f$  Temperatura final,  $T_0$  Temperatura inicial e  $\alpha_v$  coeficiente de expansão volumétrica.

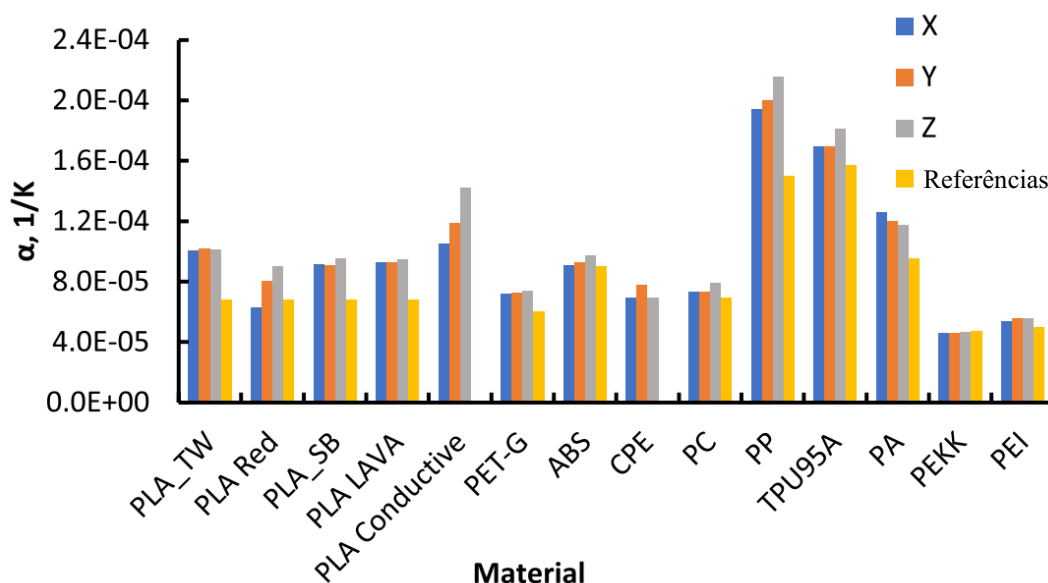
Determinados materiais poliméricos podem modificar seu volume significativamente se expostos a aquecimento. Essa característica é comumente encontrada em polímeros ramificados, sendo o principal motivo as ligações intramoleculares fracas (ÇEVIK; KAM, 2020). Em contrapartida, materiais compostos por ligações covalentes apresentam os menores coeficientes de expansão, tal como o PLA, que apresenta um dos menores coeficientes de expansão de todos os polímeros utilizados na MA com valores próximos à  $10E^{-5}$  [1/k] (BUTE *et al.*, 2023).

Além disso, o alinhamento das cadeias poliméricas é capaz de alterar significativamente o coeficiente de expansão, sendo esse o principal motivo das características anisotrópicas dos polímeros (BUTE *et al.*, 2023). Enquanto isso, a adição de fibras ou aplicação de tratamentos térmicos, como o revenimento, podem fornecer um comportamento semelhante (SUNGKAPREECHA *et al.*, 2020; MOHAMMADI *et al.*, 2023).

Essa propriedade também pode ser alterada devido a aditivos utilizados para alteração da cor ou estratégias de fabricação do filamento (BUTE *et al.*, 2023), conforme apresentado na Figura 2.3, em que é exibido o coeficiente de expansão térmica linear em função dos três eixos de impressão e a referência disponibilizada pelo fabricante, sendo empregado uma máquina

FFF para impressão dos componentes, em que o sentido de deposição de camadas foi realizado no eixo Z.

Figura 2.3 – Coeficiente de expansão térmica linear em função dos polímeros tradicionalmente comercializados para MA.



Fonte: Bute *et al.*, (2022)

Todos os polímeros exibidos na Figura 2.3 foram comparados com os valores disponibilizados pelas respectivas empresas, tal qual: PLA\_TW, ABS, CPE, PC, PP, TPU95A e PA da Ultimaker®, PLA Red, PET-G e PLA\_SB da Devil design®, PLA LAVA da Hello3d®, PLA Conductive da Proto-Pasta®, PA e PEI da Stratasys® (BUTE *et al.*, 2022).

- *Coeficiente de atrito*

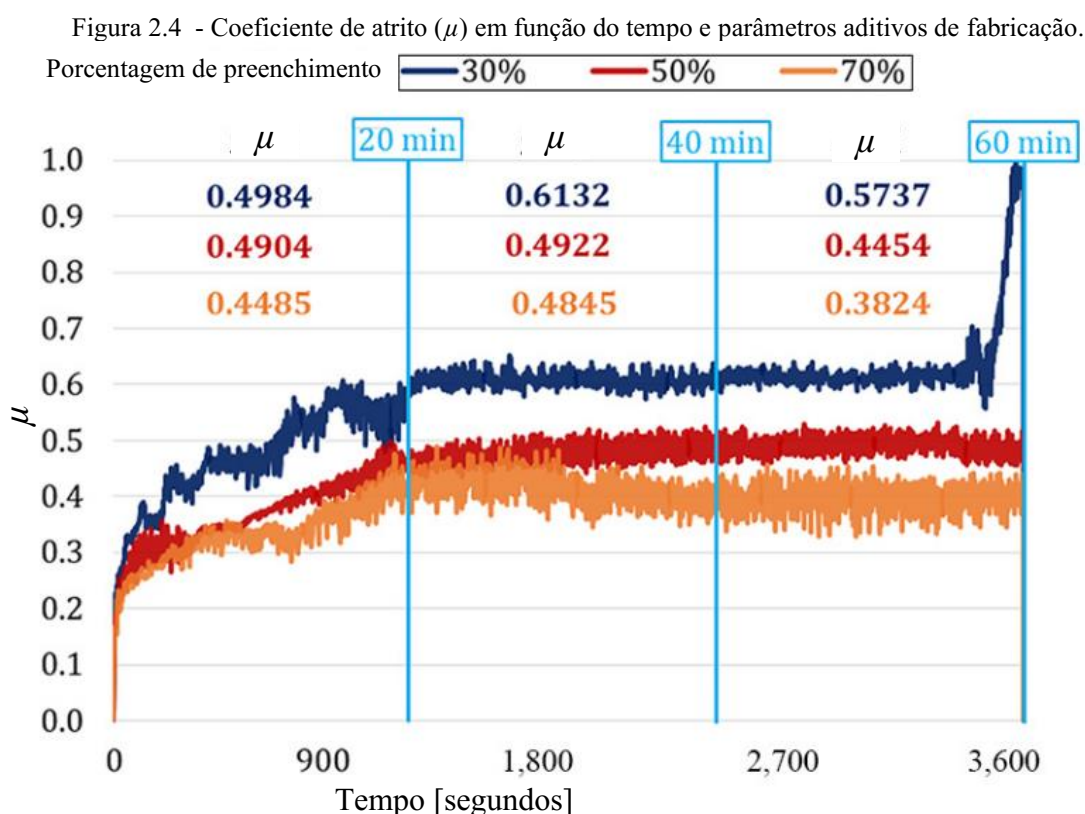
O coeficiente de atrito ( $\mu$ ) dos polímeros em diversas condições ambientais é o tema de estudo de muitos pesquisadores nas últimas décadas (GILL *et al.*, 2010; PEREPELKINA *et al.*, 2017; JOZWIK *et al.*, 2019; SIRIN *et al.*, 2023). Nesse meio, os principais parâmetros que governam a performance tribológica são subdivididos em duas categorias: os inerentes do material e os presentes no ambiente em que o material é testado/aplicado (CHOWDHURY *et al.*, 2011; JOZWIK *et al.*, 2019; SIRIN *et al.*, 2023).

No primeiro caso, as principais são: dureza e rugosidade da superfície, estrutura química do polímero, tipos de processamentos/tratamentos aplicados, comportamento viscoelástico e textura superficial. Já no segundo caso, os mais relevantes são: tipo de movimento relativo entre

corpo e contra corpo, temperatura, força aplicada, umidade relativa e vibração (CHOWDHURY *et al.*, 2011; JOZWIK *et al.*, 2019).

Dentre os materiais aplicados, os polímeros apresentam uma das maiores diversidades do  $\mu$ , na qual é possível encontrar borrachas contra sólidos com coeficientes próximo a dois (JOZWIK *et al.*, 2019), e valores próximos de 0,45 para polímeros contra metal, como o PLA e aço inoxidável (SIRIN *et al.*, 2023). Além disso, o  $\mu$  de polímeros pode modificar significativamente em função da adição de fibras, sendo possível alcançar valores próximos a 0,15 com a adição de grafite, considerando o aço inoxidável como contra corpo (BUSTILLOS *et al.*, 2018).

Outras características também podem modificar o  $\mu$  entre dois corpos, como a força e tempo de aplicação (BUSTILLOS *et al.*, 2018), e no caso específico dos componentes fabricados por MEX, os parâmetros de impressão também podem modificar significativamente o coeficiente, conforme apresentado na Figura 2.4.



Fonte: Sirin et al., (2023)

A alteração de parâmetros de fabricação da MA, como a porcentagem de preenchimento, pode afetar significativamente o  $\mu$  entre o PLA e Aço inoxidável, considerando que para este parâmetro em específico, o incremento da porcentagem de preenchimento é

inversamente proporcional ao  $\mu$  (SIRIN *et al.*, 2023). Além disso, conforme apresentado por Zhang *et al.*, (2020), é possível observar que a direção de deposição da fibra também pode afetar o  $\mu$ , sendo que o PLA fabricado por MEX apresenta um coeficiente inferior para as análises realizadas com o pino de aço inoxidável se movimentando no sentido perpendicular a direção de deposição do filamento.

- *Condutividade Térmica*

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte que governa a difusão de energia dentro de um corpo (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Para os gases e maioria dos líquidos, essa propriedade é isotrópica e pode ser descrita por meio de um único valor, mas para outros materiais, como cristais de quartzo, polímeros orientados ou compósitos, essa propriedade é anisotrópica (GARCIA *et al.*, 2021). Em todos os casos, esse fenômeno pode ser descrito por meio da lei de Fourier, conforme descrito pela equação 2.2.

$$q = -k \cdot \nabla T \quad (2.2)$$

Em que  $k$  é o vetor ou escalar da condutividade térmica, em casos anisotrópicos ou isotrópicos, respectivamente,  $q$  representa o fluxo de energia e  $\nabla T$  é o gradiente de temperatura.

Para materiais poliméricos, a condutividade térmica é essencial para definição das possíveis aplicações e limitações de processamento do material, sendo que esses materiais são geralmente associados a uma condutividade térmica inferior à dos metais, fator motivador da aplicação como isolantes térmicos (GARCIA *et al.*, 2021). Essa característica é gerada em função das fracas ligações químicas, cadeias retorcidas, emaranhamento e poros (XU *et al.*, 2018; GUO *et al.*, 2019).

Em aplicações que exigem elevada condutividade térmica, é possível utilizar polímeros dopados com nano-compósitos/fibras ou polímeros tratados térmica ou mecanicamente (JASMEE *et al.*, 2021). A aplicação de tratamentos mecânicos é justificada pelo realinhamento das cadeias poliméricas, aumentando o coeficiente de condutividade na direção das cadeias (XU *et al.*, 2018; GUO *et al.*, 2019).

A inclusão de fibras de materiais com alta condutividade térmica é uma das opções mais promissoras (JASMEE *et al.*, 2021), porém, os resultados apresentados ainda são inferiores aos materiais de base metálica ou cerâmica (NOH *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2018; GUO

*et al.*, 2019; SHEN *et al.*, 2020; SPINELLI *et al.*, 2021; ZHOU *et al.*, 2021; GARCIA *et al.*, 2021; JASMEE *et al.*, 2021; JIA *et al.*, 2022). Além disso, a porcentagem e tipo de fibras aplicadas podem alterar outras propriedades, como condutividade térmica ou coeficiente volumétrico (SHEN *et al.*, 2020; SPINELLI *et al.*, 2021).

Ademais, a estratégia de fabricação pode afetar a anisotropia do componente, sendo essa particularidade significativa para a manufatura de peças em PLA por MEX (ELKHOLY *et al.*, 2019; GARCIA *et al.*, 2021). A espessura de camada, espessura de deposição, porcentagem de preenchimento (ELKHOLY *et al.*, 2019) e direção de deposição do filamento são os parâmetros com as maiores influências nessa característica (ELKHOLY *et al.*, 2019; GARCIA *et al.*, 2021). Além disso, a condutividade pode ser alterada por meio de pós-tratamento, sendo o recozimento uma metodologia eficiente para redução da condutividade térmica de PLA com partículas de nitreto de boro extrudado por MEX (SHEN *et al.*, 2020).

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

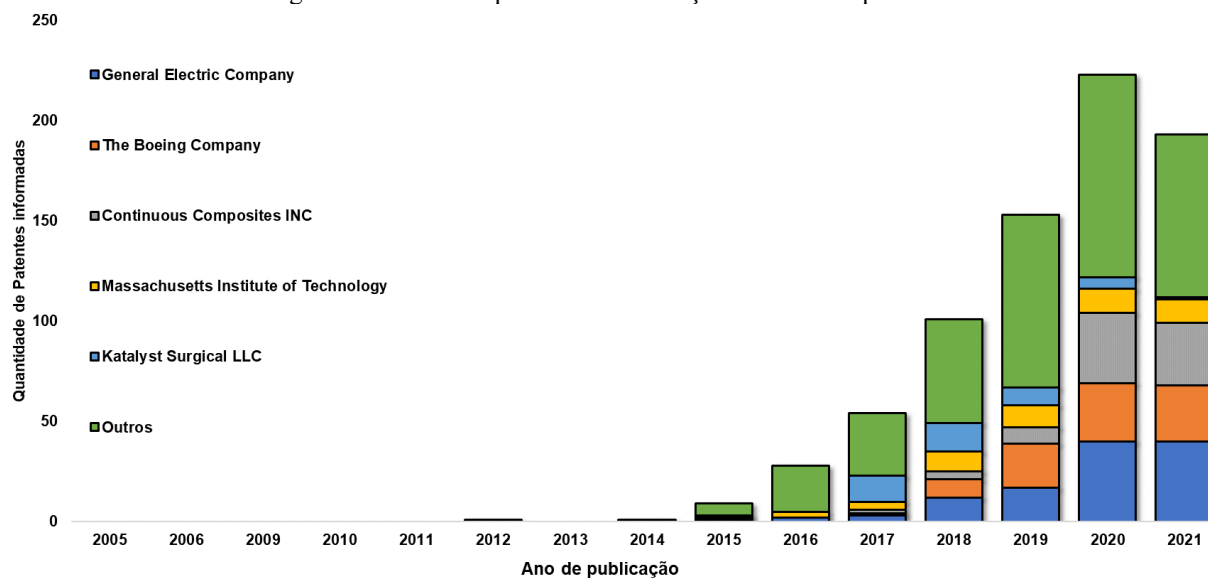
A MA pode ser definida como um processo de fabricação de peças a partir de informações de um modelo tridimensional, sendo que essa metodologia é comumente considerada oposta a MS (ISO/ASTM 52900: 2021). Inicialmente desenvolvida para fabricação de protótipos em tempo reduzido, essa metodologia evoluiu para produção de partes funcionais de diversos produtos (CORRAL *et al.*, 2021). Além disso, na literatura, esse processo pode ser referenciado como prototipagem rápida, fabricação rápida, fabricação aditiva, fabricação por camadas, processamento aditivo (EYERS; POTTER, 2017), fabricação digital aditivo e fabricação por camadas (NGO *et al.*, 2018), porém, em função das normas publicadas no tema (NBR ISO/ASTM 52900: 2021), essa técnica é referenciada como Manufatura aditiva.

Essa tecnologia aumentou significativamente sua aplicabilidade na indústria e academia, sendo que um dos principais motivos é a maior acessibilidade dos equipamentos. Essa facilidade do acesso se correlaciona principalmente com a expiração das primeiras patentes depositadas na década de 80 (NGO *et al.*, 2018; LEON *et al.*, 2019), que, aliado ao baixo custo, versatilidade e capacidade de fabricação de geometrias complexas (PARANDOUSH; LIN, 2017; CORRAL *et al.*, 2021) fomentaram a entrada de diversas empresas e grupos de pesquisas nessa área (PARANDOUSH; LIN, 2017; NGO *et al.*, 2018; CAFASSO *et al.*, 2020).

Essa evolução pode ser observada na Figura 2.5, em que é apresentada a quantidade de patentes publicadas entre os anos de 2005 e 2021, sendo que o aumento porcentual delas

após 2012 foi gerado principalmente em função do vencimento da proteção das primeiras patentes de MA (NGO *et al.*, 2018; LEON *et al.*, 2019). Os principais grupos responsáveis pelas patentes são: General Electric<sup>®</sup>, Boeing<sup>®</sup>, Continuous Composites INC<sup>®</sup>, Massachusetts Institute of Technology<sup>®</sup> (MIT), Katalyst Surgical LLC<sup>®</sup>.

Figura 2.5 - Patentes publicadas em função do ano e empresa.

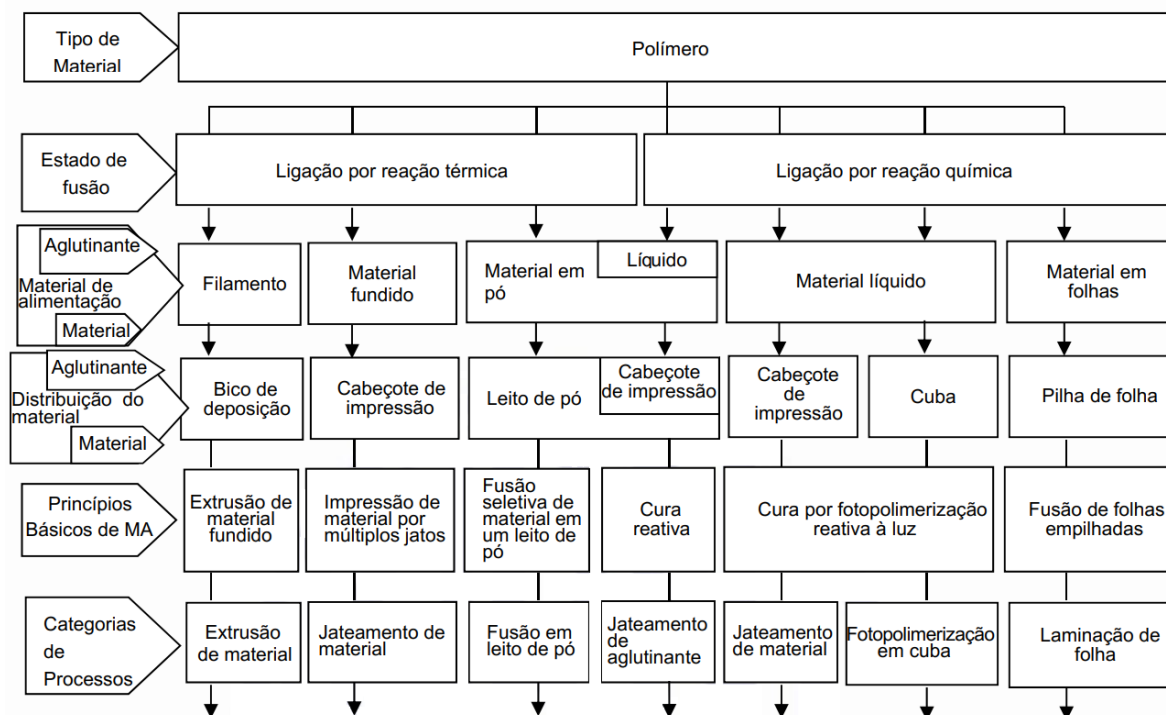


Fonte: LENS, 2022, Patent Search, Ferramenta de procura de patentes depositadas, Disponível em: <https://www.lens.org>, acessado em: 18 mai. 2022.

### 2.2.1 Processos de fabricação por manufatura aditiva

Desde a primeira patente publicada em 1986, a MA foi a terminologia utilizada para diversos processos criados para o processamento de metais a compósitos poliméricos (LEON *et al.*, 2019). Nesse ínterim, uma das principais categorizações dos processos realizada pela norma NBR ISO/ASTM 52900 (2021), utilizando de sete grupos, são: jato de aglutinante (BJT), deposição por energia direcionada (DED), extrusão de material (MEX), jateamento de material (MJT), fusão em leito de pó (PBF), laminação em folha (SHL) e fotopolimerização em cuba (VPP). Todos esses grupos podem ser associados em função das características do processamento de material, em que as principais são os mecanismos união, formato e distribuição da matéria-prima, além da dinâmica de movimentação da máquina (ISO/ASTM 52900: 2021), em que essa definição dos grupos e principais aspectos utilizados para identificar as metodologias dos materiais poliméricos são apresentadas na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Representação dos princípios de processamento de materiais poliméricos para manufatura aditiva em função das características de processamento.



Fonte: NBR ISO/ASTM 52900 (2021)

Na Figura 2.6 são apresentadas as principais características de cada categoria de MA. Por meio desta característica, é possível definir subgrupos que podem ajudar a identificar semelhanças em materiais utilizados, dinâmicas envolvidas na manufatura e possíveis limitações. De tal forma, nesse tópico serão apresentadas apenas as categorias que apresentem semelhanças com o processo investigado nesta pesquisa, a extrusão de material (MEX). As categorias selecionadas a Deposição por energia direcionada (DED) e Fusão em leito de pó (PBF), além da própria categoria utilizada neste trabalho, extrusão de material (MEX).

- *Deposição por energia direcionada (DED)*

A classificação DED recebe essa terminologia devido as características da energia utilizada, em que a geração da camada ocorre por meio da utilização de energia térmica

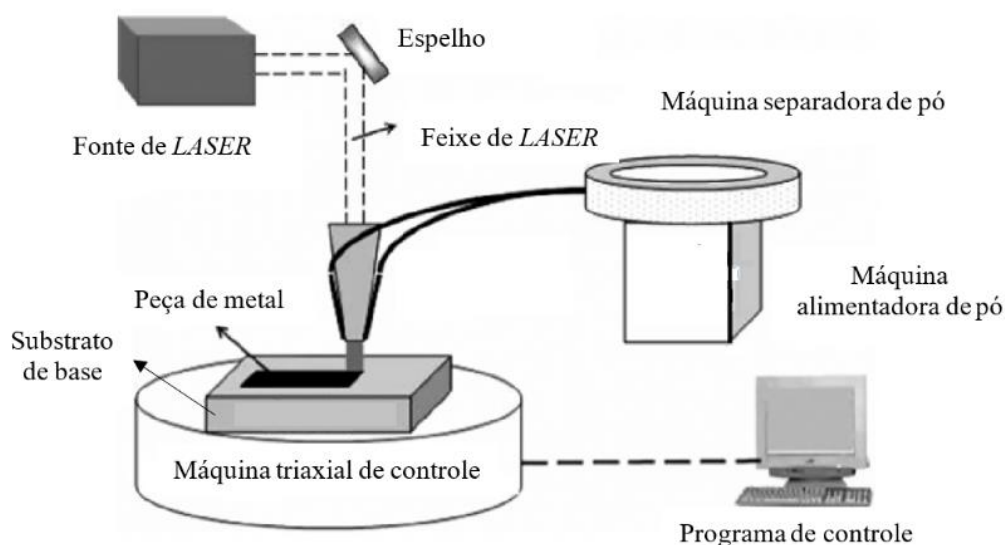


focalizada em uma região na qual está ocorrendo o jateamento de material (ISO/ASTM 52900: 2021).

Diversos processos podem ser classificados nesse grupo, sendo que, os principais são a *LASER melting deposition (LMD)* e *Electron beam melting (EBM)* (DEZAKI *et al.*, 2022; FELDHAUSEN *et al.*, 2022), em que ambos apresentam a mesma cinemática de deposição, sendo que as diferenças são reduzidas a fonte de energia, capacidade de focalização e possíveis preparações pré-manufatura (DEZAKI *et al.*, 2022).

Na Figura 2.7 é representado o processo *LMD*, na qual a principal diferença dos componentes apresentados na figura e os necessários no processo *EBM* é a necessidade de uma câmara de vácuo para o processo de feixes de elétrons (GOKULDOSS *et al.*, 2017; LIANG *et al.*, 2022). Além disso, ambas metodologias podem realizar o transporte do material por gravidade ou por auxílio de um gás inerte (BIKAS; STAVROPOULOS. CHRYSOLOURIS, 2016).

Figura 2.7 - Representação esquemática do processo e principais componentes presentes na técnica de manufatura *LMD*



Fonte: <http://sustainableskies.org>, acessado em: 18 mai. 2021.

Conforme apresentado na Figura 2.7, entre a fonte do laser e o bocal é utilizado um conjunto de espelhos cuja principal função é modificar o local de atuação da fonte térmica sem a necessidade de movimentar todo equipamento (GOKLDROSS *et al.*, 2017). Além disso, máquinas com elevados graus de liberdade podem apresentar a capacidade de movimentação da mesa de deposição em conjunto do bocal, permitindo assim uma maior liberdade geométrica dos projetos (DEZAKI *et al.*, 2022).

As principais vantagens desses processos são a grande diversidade de materiais aplicados e, em alguns casos a capacidade de fusão completa e possibilidade de fabricação de geometrias complexas (GOKULDOSS *et al.*, 2017; DEZAKI *et al.*, 2022; FELDHAUSEN *et al.*, 2022). Em contrapartida, as desvantagens se resumem ao alto custo de obtenção dos equipamentos necessários (FELDHAUSEN *et al.*, 2022), em especial o *EBM*, com custo significativamente elevado em relação as demais metodologias aditivas (LIANG *et al.*, 2022).

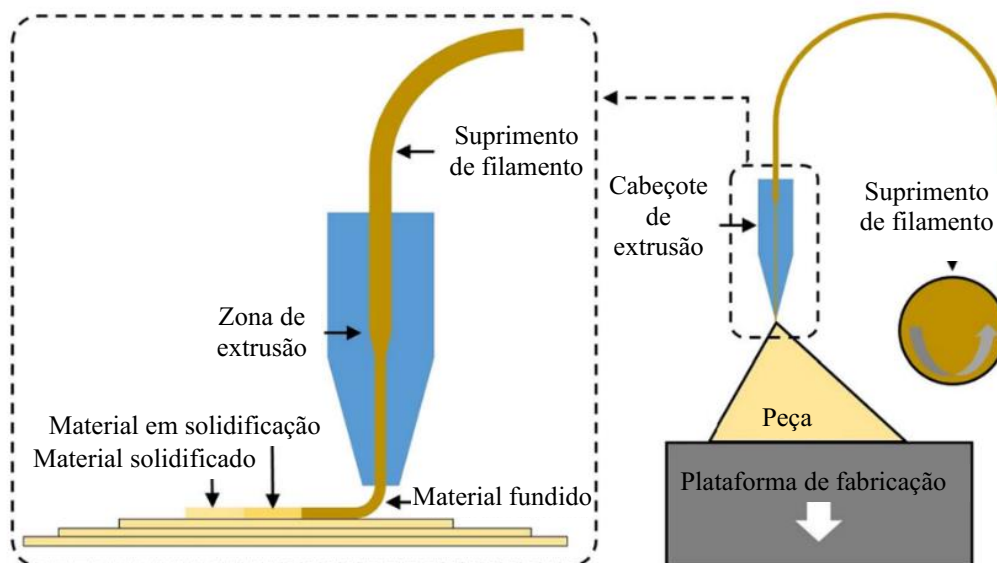
- *Extrusão de material (MEX)*

Os processos categorizados no grupo MEX são identificados em função da deposição de material fundido, que ocorre por meio da deposição seletiva de material através de um bocal ou orifício (ISO/ASTM 52900: 2021), sendo que o processo mais conhecido e utilizado do grupo MEX é a Fabricação por Filamento Fundido (FFF). Inicialmente denominado como *Fused Deposition Modeling (FDM®)* pela Stratasys® ao final da década de 80 (GUO *et al.*, 2013; VAES *et al.*, 2019), esse processo foi renomeado após o término da patente na última década para diferenciar o produto comercializado pela Stratasys® e a categoria de processo (CORRAL *et al.*, 2021).

O processo por FFF utiliza um cabeçote móvel capaz de depositar um termoplástico fundido sobre o substrato, tendo em vista que esse material é geralmente aquecido à 1 °C acima do ponto de fusão para permitir que seja solidificado logo após deposição (GARCIA *et al.*, 2021). Na Figura 2.8 é apresentado uma representação esquemática da FFF com os principais componentes desse método, o bocal, mesa suporte e filamento base. Além disso, em casos específicos podem ser utilizados múltiplos bocais, permitindo utilizar diferentes materiais para alcançar requisitos de projetos, estéticos ou viabilizar fabricação com suporte de um material com resistência inferior ao corpo principal da peça (CHEN *et al.*, 2020).

Na Figura 2.8 é representado esquematicamente os principais componentes das máquinas de FFF e os estados do filamento ao longo do percurso de deposição, na qual o material é depositado no estado fundido e, após a interação com a peça, é solidificado em contato com a camada anterior (BIKAS *et al.*, 2016; ELKGOLY *et al.*, 2019; GUO *et al.*, 2021).

Figura 2.8 - Representação esquemática da FFF, apresentando os principais componentes e evolução do estado do material no processamento



Fonte: Bikas *et al.*, (2016)

Ademais, as características, como tipo e tamanho do bocal (CHEN *et al.*, 2020), além da câmara de impressão, que afeta o resfriamento do material (SHEN *et al.*, 2020), são essenciais para garantir consistência e otimização das propriedades mecânicas (CHACÓN *et al.*, 2017; GARCIA *et al.*, 2021) e térmicas (ELKHOLY *et al.*, 2019; SHEN *et al.*, 2020; GARCIA *et al.*, 2021). O comportamento da alteração dessa característica depende do material, porém, no caso específico do PLA, a utilização de bocais com diâmetros maiores gera aumento da porosidade (ELKHOLY *et al.*, 2019) e, no caso específico do processamento sem a devida proteção de uma câmara de impressão, há a dificuldade de controle geométrico dos componentes fabricados em função da elevada oscilação térmica (BUTE *et al.*, 2023).

As principais vantagens associadas a essa categoria são o custo reduzido dos materiais, maquinário e componentes associados (GNANASEKARAN *et al.*, 2017), não toxicidade para maioria dos materiais e simplicidade de uso (BIKAS *et al.*, 2016; GARCIA *et al.*, 2021). Entre as desvantagens, as principais são a necessidade de trabalhar com materiais de baixo ponto de fusão (BUTE *et al.*, 2023), dificuldade em utilização de suportes (GARCIA *et al.*, 2021) e baixa qualidade superficial (GUO *et al.*, 2021).

- *Fusão em leito de pó (PBF)*

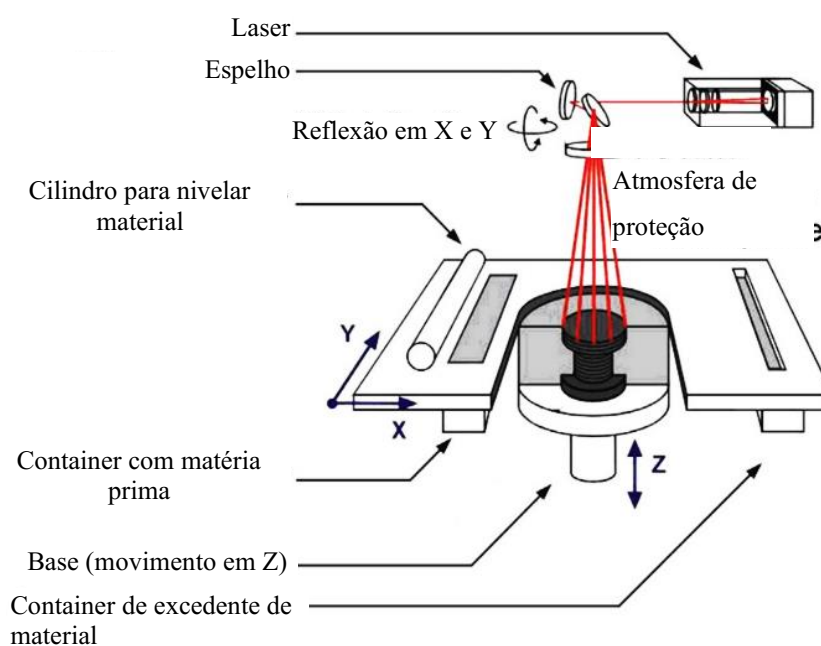
A classificação PBF recebe esse nome devido o estado e disposição do material no início de geração de cada camada. Nesse grupo, é utilizado uma fonte térmica para fundir

seletivamente regiões do leito de pó (ISO/ASTM 52900: 2021), sendo possível utilizar fonte de energia a LASER ou feixe de elétrons (NGO *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2023).

As principais metodologias de fabricação desse grupo são a *Select Laser Sintering (SLS)* e *Select Laser Melting (SLM)* (PLOTKOWSKI *et al.*, 2021). A principal diferença desses métodos é a quantidade de energia utilizada, sendo que no *SLS* é suficiente apenas para fundir a superfícies das partículas do material, enquanto o *SLM* é capaz de fundir completamente a matéria-prima (WANG *et al.*, 2023).

Na Figura 2.9 é realizada a representação esquemática dos componentes envolvidos na *SLS*, enquanto, na fabricação por *SLM*, utiliza equipamentos equivalentes, porém, com uma fonte de energia térmica de maior potência ou capaz de reduzir a região aquecida para a mesma energia (PLOTKOWSKI *et al.*, 2021).

Figura 2.9 - Representação esquemática do processamento SLS e os principais equipamentos utilizados para aplicação da técnica.



Fonte: Shahzad *et al.*, (2014)

A sinterização ou fundição seletiva de cada região de uma camada é realizada por meio de movimento de espelhos, e esse procedimento é necessário para evitar movimentações desnecessárias da fonte de energia (NGO *et al.*, 2018). Além disso, outros componentes, como base móvel da peça, cilindro de distribuição e container para coleta do excesso do pó funcionam de forma semelhante tanto para as técnicas *SLS*, quanto para as *SLM*, em que, após cada camada depositada, a câmara que a peça está localizada se desloca para baixo e o compartimento com suprimento é movimentado no sentido inverso, o desnível do pó ocasionado é anulado por meio

de um cilindro que é movimentado da câmara com pó para câmara com a peça (WANG *et al.*, 2023).

As principais vantagens desse método são a grande diversidade de materiais empregados, que podem ser polímeros, metais e compósitos, além da capacidade de fabricar componentes com elevada resistência mecânica em relação as demais técnicas de MA (NGO *et al.*, 2018; TAN *et al.*, 2020). Como desvantagens, as principais se consistem no preço elevado dos equipamentos e necessidade de procedimentos de segurança para manusear o pó utilizado na fabricação (TAN *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2023).

### **2.2.2 Polímeros e seus compósitos utilizados na manufatura aditiva**

Para qualquer processo de manufatura, incluindo MA, a matéria-prima deve estar em um estado/forma compatível com o processo a ser utilizado, que seja pó, lâmina, filamento ou líquido (TAN *et al.*, 2020). As propriedades químicas/físicas são igualmente essenciais para o funcionamento do processo, um polímero apto ao processamento por PBF não é necessariamente a melhor opção para ser utilizado como filamento em FFF (BOURELL *et al.*, 2017; LEÓN *et al.*, 2019).

No Quadro 2.1 são apresentados os principais materiais comercialmente utilizados por categoria de MA, sendo possível observar a grande variedade de materiais disponíveis para uso de polímeros, cerâmicos à metais e, em alguns processos específicos, até mesmo utilizar alimentos como chocolate (BOURELL *et al.*, 2017). Todavia, a aplicação de um mesmo material em processos diferentes não ocorrerá com a matéria prima na mesma forma (LEÓN *et al.*, 2019). O PEEK utilizado para MEX estará em formato de filamento, enquanto para processos da PBF será no formato de pó (BOURELL *et al.*, 2017).

Quadro 2.1 – Principais materiais processados por MA, subdividido por categorias.

	MEX	VPP	MJT	PBF	BJT	SHL	DED
ABS	x						
POLICARBONATO	x						
PC/ABS MISTURA	x						
PLA	x						
PEI	x						
ACRÍLICOS	x	x	x				
ACRILATOS		x	x				
EPÓXI		x	x				
NYLON 11 E 12				x			
POLIESTIRENO				x			
POLIPROPILENO				x			
POLIÉSTER				x			
PEEK	x			x			
POLIURETANO	x			x			
CHOCOLATE	x						
PAPEL						x	
ALUMÍNIO				x	x	x	x
LIGAS DE CO–CR				x	x		x
OURO				x			
LIGAS DE NÍQUEL				x	x		
PRATA				x			
AÇO INOXIDÁVEL				x	x	x	x
TITÂNIO				x	x	x	x
TI–6AL–4V				x	x	x	x

Fonte: Bourell *et al.*, (2017)

Dentre as categorias da MA, a MEX se destaca como um grupo com maior diversidade de polímeros aplicáveis aliado ao baixo custo de obtenção, sendo que os polímeros mais utilizados são o policarbonato (PC), poliacido láctico (PLA), polietilenoimina (PEI), acrilonitrila butadieno estireno (ABS), Nylon 11 e 12, polieteretercetona (PEEK) e poliuretano termoplástico (Elastômero) (BOURELL *et al.*, 2017).

- *Materiais Poliméricos*

Termoplásticos amorfos são ideais para os processos de extrusão de polímero como a FFF (BOURELL *et al.*, 2017), sendo que a modificação da viscosidade em função da temperatura desses materiais é uma das principais características necessárias para esses

processos, pois permite uma extrusão uniforme pelo bocal e reduz poros da peça (ELKHOLY *et al.*, 2019).

Existem diversos polímeros que atendem os requisitos para FFF, sendo que os mais populares foram citados no Quadro 2.1. Dentre os citados, o PLA se destaca por suas características biodegradáveis e biocompatibilidade (FARAH *et al.*, 2016; MOETAZEDIAN *et al.*, 2020), além das propriedades térmicas como coeficiente de expansão térmica e temperatura de fusão ideais para o FFF de baixo custo (ELKHOLY *et al.*, 2019).

O PLA pode ser utilizado em diversas áreas, como aeroespacial, industrial e médica (MOETAZEDIAN *et al.*, 2020), além de ser considerado o possível substituto de polímeros petroquímicos devido sua elevada resistência mecânica e módulo de elasticidade (FARAH *et al.*, 2016). Esse conjunto dessas características, acompanhado da crescente preocupação com descarte de materiais poliméricos, resultaram no aumento das vendas do material nos últimos anos (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010; GEYER *et al.*, 2017).

O PLA possui um conjunto único de propriedades, cuja principais são a elevada resistência mecânica, baixa toxicidade e baixa temperatura de processamento (ELKHOLY *et al.*, 2019). No Quadro 2.2 é apresentado as propriedades mecânicas do PLA, entretanto, conforme apresentado por Farah *et al.*,(2016), possíveis modificações desse conjunto de propriedade em função das características do processamento (FARAH *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2020) e fabricante (FARAH *et al.*, 2016; BUTE *et al.*, 2022).

Quadro 2.2 - Propriedades do filamento PLA puro

PROPRIEDADE	UNIDADE	PLA
DENSIDADE	g/cm <sup>3</sup>	1,21-1,25
RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	MPa	21-60
MÓDULO DE ELASTICIDADE	GPa	0,35-3,50
DEFORMAÇÃO MÁXIMA	%	2,5-6
RESISTÊNCIA A TRAÇÃO ESPECÍFICA	Nm /g	16,8-48,0
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESPECÍFICO	kNm /g	0,28-2,80
TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA	°C	45-60
TEMPERATURA DE FUNDIÇÃO	°C	150-162

Fonte: Adaptado de Farah *et al.*, (2016)

- *Materiais Compósitos*

A aplicação de fibras de reforço pode melhorar as propriedades de componentes produzidas por MA (ELKHOLY *et al.*, 2019). A categorização das fibras pode ser realizada de diversas formas, sendo tradicionalmente definida pelo autor, como, por exemplo, Bourell *et al.*

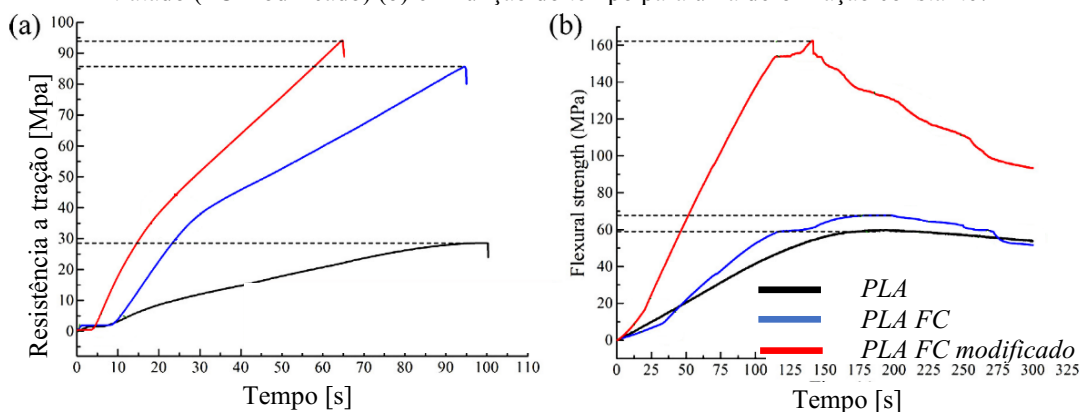
(2017) categorizaram a aplicação de fibras em três grupos, *whiskers* ( $<50\ \mu\text{m}$ ), curto ( $>50\ \mu\text{m}$ ) e longo/Contínuo, em que o último grupo pode ser associado a fibras com tamanho na mesma escala que a peça, enquanto outros autores agrupam em apenas dois grupos, fragmentadas e contínuo (JOZWIK *et al.*, 2019; LEÓN *et al.*, 2019; SPINELLI *et al.*, 2021).

A aplicação de fibras inferiores a  $50\ \mu\text{m}$  está associada ao incremento das propriedades térmicas e elétricas (SPINELLI *et al.*, 2021), além do pequeno incremento das propriedades mecânicas (LEÓN *et al.*, 2019). Em alguns casos podem ser utilizadas fibras curtas apenas com objetivo de facilitar o processamento do material (NGO *et al.*, MOHAMMADI *et al.*, 2023).

Os compósitos contendo fibra contínua podem apresentar melhores propriedades mecânicas (BOURELL *et al.*, 2017; ÇEVIK *et al.*, 2020) e térmicas em comparação aos demais grupos (ÇEVIK *et al.*, 2020; DOU *et al.*, 2020), porém a aplicação desses materiais ainda apresenta muitos desafios, principalmente em relação a definição da velocidade de deposição (DOU *et al.*, 2020; AKHOUNDI *et al.*, 2023), temperatura de deposição (AKHOUNDI *et al.*, 2023) e orientação de deposição (MILENKOVIC *et al.*, 2021). Porém, até o momento não existe uma metodologia clara de como deve ser realizado o processamento com MA para fibras contínuas (PARANDOUSH; LIN, 2017; MILENKOVIC *et al.*, 2021; AKHOUNDI *et al.*, 2023).

A aplicação de fibras em uma matriz polimérica pode ocorrer em diversas etapas, sendo o pré-processamento da fibra responsável por garantir a melhor adesão da matriz polimérica e fibra e, conseqüentemente, elevando as propriedades mecânicas da peça (PARANDOUSH *et al.*, 2017; RARANI *et al.*, 2019). Na Figura 2.10 é apresentado um comparativo das propriedades mecânicas do PLA, PLA com fibra de carbono (FC) e PLA com FC tratado.

Figura 2.10 - Resistência à tração do PLA, PLA com fibra de carbono (FC) e PLA com fibra de carbono tratado (FC modificado) (a) e resistência à flexão do PLA, PLA com fibra de carbono (FC) e PLA com fibra de carbono tratado (FC modificado) (b) em função do tempo para uma deformação constante.



Fonte: Li *et al.*, (2016)



Conforme apresentado na Figura 2.10, o PLA com fibra contínua tratada obteve um aumento significativo na resistência a flexão, sendo esse aumento ocasionado em função da modificação das características superficiais da fibra que permitiu maior adesão a matriz polimérica. Nesse estudo em específico, a modificação das características superficiais da FC foi realizada por meio da aplicação de uma solução de dicloreto de metileno e água deionizada, conforme Li *et al.*, (2016). Enquanto isso, estudos recentes apontam que a fabricação do filamento de PLA com fibra contínua de carbono pode gerar uma evolução semelhante caso seja processada no vácuo (LI *et al.*, 2021).

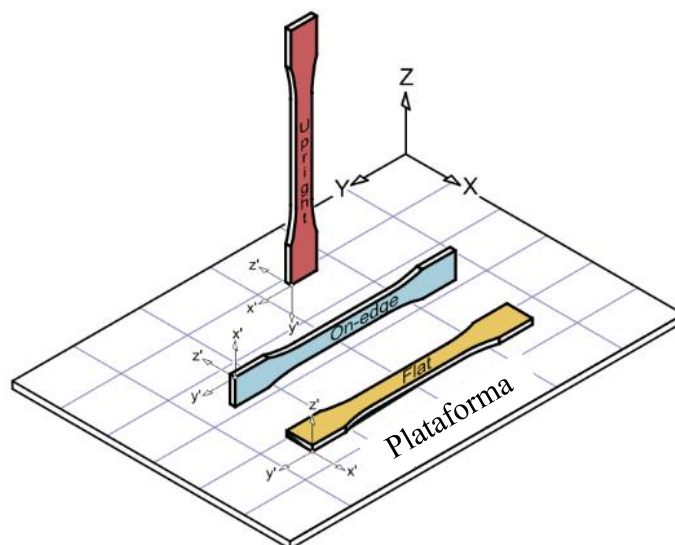
### 2.2.3 Parâmetros de controle dos processos aditivos

A FFF é um processo com diversos parâmetros de controle que influenciam diretamente o aspecto visual (CORRAL *et al.*, 2021), propriedades físicas (ELKHOLY *et al.*, 2019) e tempo de produção das peças (CHACÓN *et al.*, 2017; AKHOUNDI *et al.*, 2023). A escolha desses parâmetros de fabricação pode ser uma etapa complexa devido a elevada quantidade de opções e suas características conflitantes (AKHOUNDI *et al.*, 2023). Entre os diversos parâmetros de fabricação, os principais são a orientação de fabricação, espessura de contorno, espessura de deposição, ângulo de deposição, espessura de deposição (MOHAMED *et al.*, 2015; CASTILLO *et al.*, 2019; CORRAL *et al.*, 2021), padrão de preenchimento (ELKHOLY *et al.*, 2019), porcentagem de preenchimento, espessura de camada (CASTILLO *et al.*, 2019), temperatura de extrusão e temperatura da plataforma (AKHOUNDI *et al.*, 2023).

- *Orientação de fabricação*

Este parâmetro é responsável pela definição da posição da peça a ser fabricada, em que sua definição é o principal causador das características anisotrópicas superficiais e mecânicas da peça (CORRAL *et al.*, 2021), além de possibilitar a fabricação de componentes sem suportes, caso necessário (EILIAT; URBANIC, 2019). É apresentado na Figura 2.11 as três principais orientações de construção *uprighth*, *On-Edge* e *Flat*, considerando que a deposição de camadas ocorra no eixo Z e todas as camadas depositadas estejam contidas nos planos paralelos aos eixos Y e X.

Figura 2.11 - Representação esquemática das três principais orientações de construção, *Upright*, *On-Edge* e *Flat*

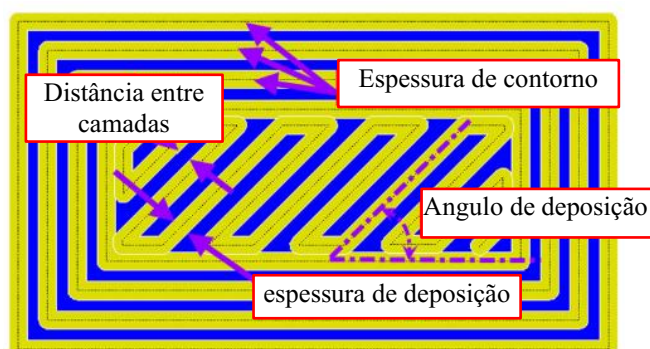


Fonte: Chacón *et al.*, (2017)

- *Espessura do contorno*

A espessura de contorno, ou quantidade de filamentos no contorno, afeta as propriedades mecânicas e superficiais da peça (CASTILLO *et al.*, 2019), esse efeito é amplificado para peças com tamanho reduzido, principalmente nos locais em que grande parte do padrão de preenchimento interior será substituído pelo contorno a ser adicionado (CORRAL *et al.*, 2021). Na Figura 2.12 é apresentado, dentre diversos parâmetros, a espessura/quantidade de contorno. Sendo que esse valor pode ser modificado para diferentes regiões da peça (CASTILLO *et al.*, 2019), porém essa capacidade está limitada em função do tipo de *software* aplicado no fatiamento (CAFASSO *et al.*, 2020).

Figura 2.12 – Representação esquemática dos parâmetros utilizados na FFF, espessura de deposição, espessura de deposição, espessura de contorno e ângulo de deposição.

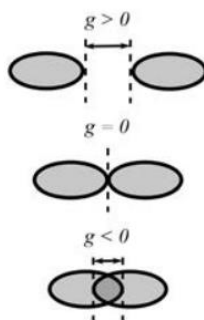


Fonte: Mohamed *et al.*, (2016)

- *Espessura de deposição*

Esta especificação é utilizada para definir a distância entre duas deposições vizinhas de uma camada. Além disso, esse parâmetro pode assumir valores negativos ou positivos, sendo que, para valores positivos existirá uma distância entre deposições da mesma camada, enquanto os negativos são depositados com interferência ao material da vizinhança (ELKHOLY *et al.*, 2019). Distâncias positivas podem diminuir a resistência mecânica da peça, enquanto as negativas aumentam o contato entre os filamentos depositados e, por conseguinte, eleva as propriedades mecânicas, porém, podem ocasionar distorções dimensionais na peça (AKHOUNDI *et al.*, 2023). Na Figura 2.12 é representado a distância entre deposições, sendo positivo na figura, enquanto na Figura 2.13 é representado as três possíveis categorias de distância entre deposições: positiva, nula e negativa.

Figura 2.13 - Representação esquemática da distância entre filamentos positiva ( $g > 0$ ), nula ( $g = 0$ ) e negativa ( $g < 0$ )



Fonte: Turner e Gold (2015)

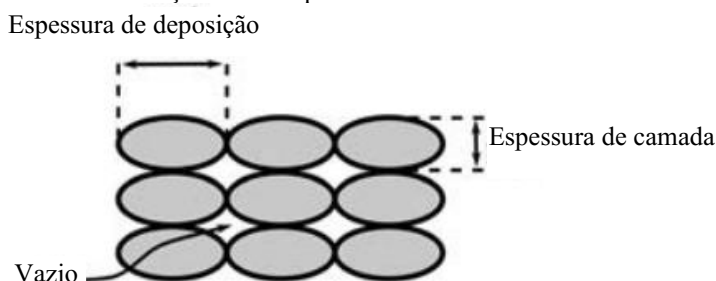
- *Ângulo de deposição*

Este parâmetro afeta as características anisotrópicas e propriedades mecânicas das peças (CASTILLO *et al.*, 2019). A sua definição deve ser realizada considerando as possíveis aplicações do componente a ser fabricado, como a rugosidade (GUO *et al.*, 2021) e tolerâncias geométricas (MESSIMER *et al.*, 2019). Na Figura 2.12 é representado esquematicamente o ângulo de deposição interno de uma peça, sendo esse ângulo referenciado pela camada de contorno.

- *Espessura de deposição*

A espessura de deposição possui efeito limitado sobre as características dos componentes produzidos por MA (AHMADIFAR *et al.*, 2021). Sua aplicação em níveis reduzidos pode gerar um módulo de armazenamento superior, porém, as peças podem necessitar de maior tempo de produção (ELKHOLY *et al.*, 2019). Na Figura 2.12 é representado a espessura do filamento em conjunto com outros parâmetros de deposição, enquanto na Figura 2.14 é apresentada os vazios gerados pela interação da espessura de deposição e espessura de camada.

Figura 2.14 - Representação esquemática da espessura de deposição, espessura de camada e vazios originados dessa interação entre os parâmetros escolhidos



Fonte: Turner e Gold (2015).

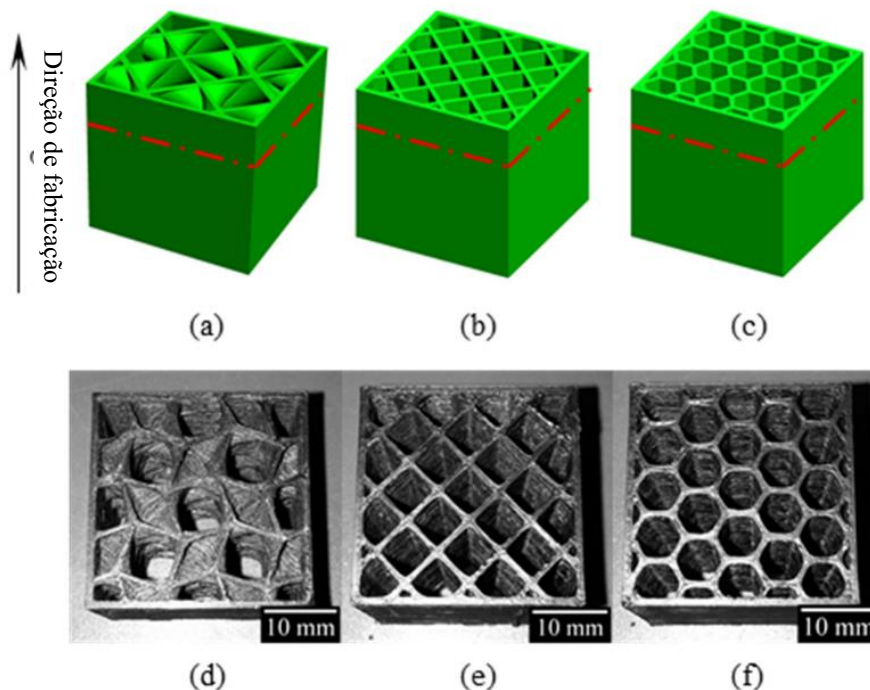
- *Padrão de preenchimento*

Conforme apresentado por Elkholy *et al.*, (2019), a avaliação de qual padrão de preenchimento que pode ser utilizado para um esforço específico deve ser realizada por meio experimental ou simulação, não sendo possível definir qual melhor estratégia por meios teóricos.

Um exemplo de análise do padrão de preenchimento foi realizado por uma pesquisa realizada pelos autores Shen *et al.*(2022), em que foi estudado e comparado as diferenças entre corpos de provas fabricados por estratégias de deposição hexagonal, grade, e o proposto na pesquisa, o preenchimento em origami, conforme apresentado na Figura 2.15, utilizado as imagens (a), (b) e (c) para representação gráfica, e (d), (e) e (f) para identificar os componentes fabricados. Nesse experimento foi utilizado o processo de extrusão FFF, sendo que os resultados apontam que o padrão em origami gerou a maior resistência a tração, além de maior rigidez. Outros exemplos de padrões podem ser apresentados (URQUIZO *et al.*, 2022; SHEN *et al.*, 2022; BIROSZ *et al.*, 2023), porém a principal característica necessária ao projeto é a

capacidade de personalização do parâmetro em função da necessidade do projetista (BIROSZ *et al.*, 2023).

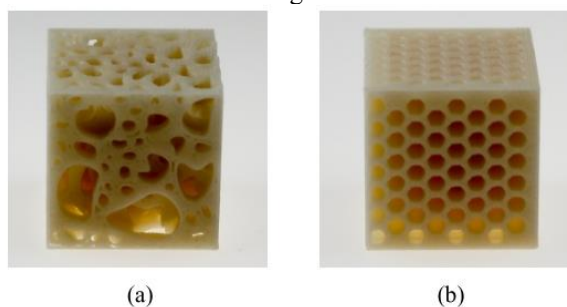
Figura 2.15 - Exemplo de preenchimento em (a) e (d) origami, (b) e (e) grade, e (c) e (f) hexagonal



Fonte: Shen *et al.*, (2022)

Um exemplo de especificação foi apresentado no trabalho de Yoon *et al.*, (2014), apresentado na Figura 2.16, em que foi utilizado o processo FFF para gerar um padrão significativamente complexo, uma réplica da estrutura óssea denominado trabecular, sendo esse comparado com o preenchimento hexagonal. Ao final do experimento foi possível afirmar que a estratégia trabecular como melhor opção são para peças que necessitam de alta elasticidade, enquanto a hexagonal se destaca para esforços elevados e capacidade de absorção de energia antes da falha.

Figura 2.16 - Exemplos de cubos fabricados com (a) estrutura similar ao osso Trabecular, e (b) preenchimento hexagonal

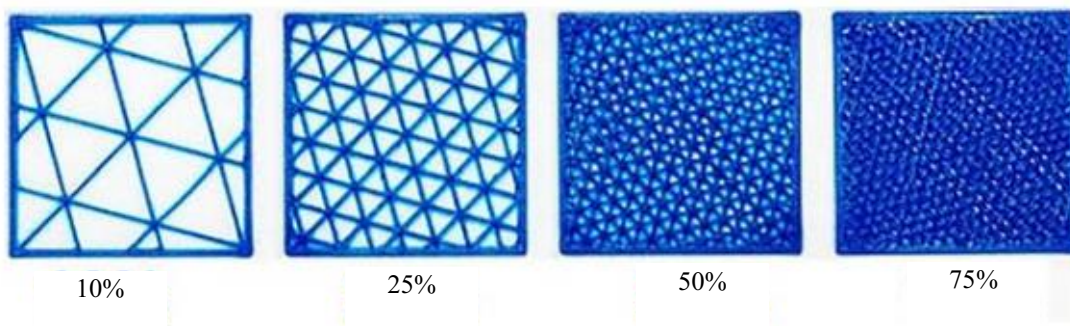


Fonte: Yoon *et al.*, (2014)

- *Densidade de preenchimento*

A porcentagem de preenchimento possui significativa importância para as propriedades mecânicas (ŞIRIN *et al.*, 2023) e o incremento desse parâmetro aumenta a resistência mecânica (BIROSZ *et al.*, 2023), porém, essa modificação é acompanhada do aumento do material e tempo necessário para fabricar a peça (CASTILLO *et al.*, 2019). Na Figura 2.17 é apresentado quatro exemplos de porcentagens de preenchimento triangular e, nesse caso, todos os demais parâmetros foram mantidos constantes.

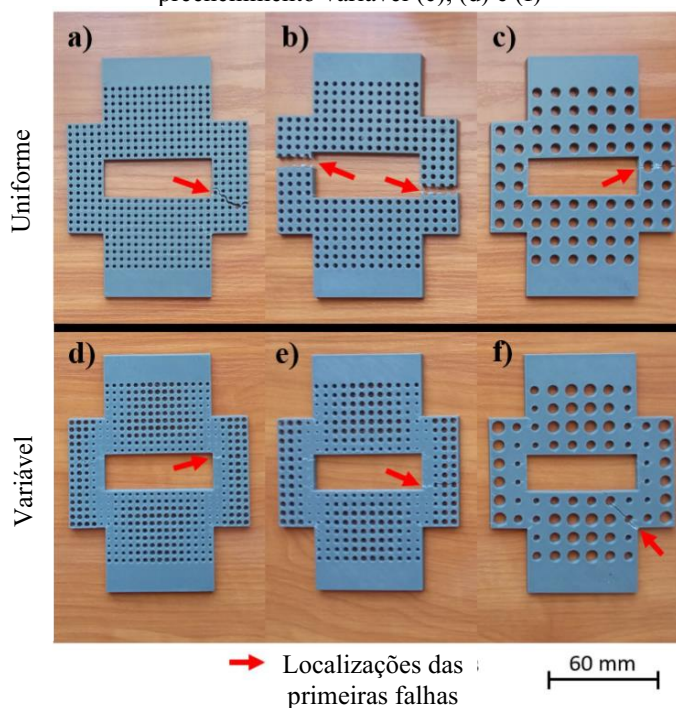
Figura 2.17 - Demonstração do incremento da porcentagem de preenchimento triangular para quatro peças distintas, sendo que todos demais parâmetros foram mantidos constantes



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

Ademais, existe a possibilidade de alteração dessa característica em regiões específicas do componente, a exemplo dessa aplicação sendo realizada no trabalho dos autores Birosz *et al.* (2023), em que a porcentagem de preenchimento é alterada em função dos concentradores de tensão do componente. Na Figura 2.18 são apresentados os componentes com preenchimento constante (a), (b) e (c), e variável (c), (d) e (e), sendo que todos os componentes fabricados com preenchimento variável obtiveram resistência a tração superior.

Figura 2.18 Componentes expostos a ensaios de tração, apresentando preenchimento constante (a), (b) e (c) e preenchimento variável (c), (d) e (f)



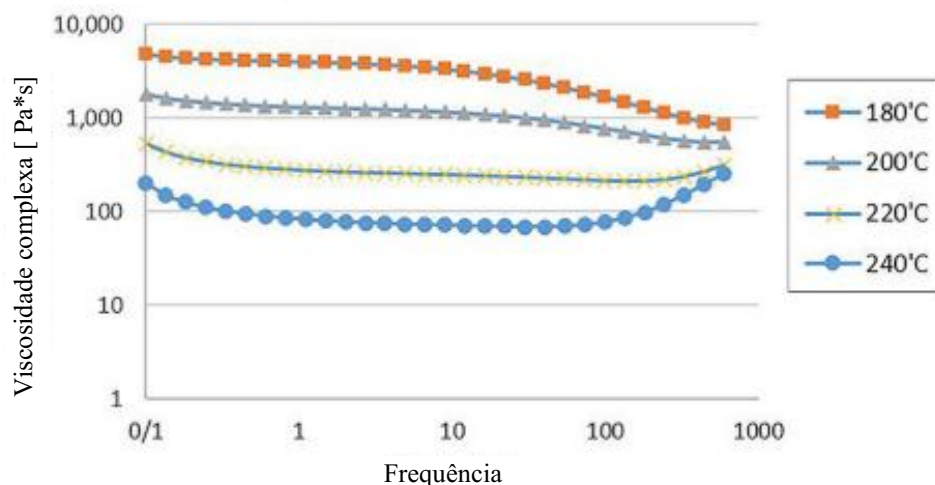
Fonte: Birosz *et al.*, (2023)

- *Temperatura de extrusão e temperatura da plataforma*

A temperatura de extrusão pode influenciar as propriedades mecânicas (AKHOUNDI *et al.*, 2023) e características superficiais (CORRAL *et al.*, 2021; GUO *et al.*, 2021) das peças fabricadas por MA. O aumento da temperatura causa maior adesão dos filamentos e reduz os vazios (CORRAL *et al.*, 2021), porém esse aumento deve ser limitado para evitar a degradação do polímero, fator que reduz significativamente as propriedades e confiabilidade mecânica (GINJUPALLI *et al.*, 2017; SCAFFARO *et al.*, 2021; AKHOUNDI *et al.*, 2023).

A evolução da viscosidade complexa em função do tempo de exposição a elevadas temperaturas é apresentada na Figura 2.19, em que são utilizadas o PLA aquecido à 180 °C, 200 °C, 220 °C e 240 °C. Nesse gráfico, foi decidido utilizar a frequência no eixo x ao contrário do tempo, sendo utilizado esse parâmetro para facilitar a associação do tempo de permanência do PLA no bocal e a viscosidade ocasionada, ou seja, da esquerda para direita é possível observar o aumento da velocidade de extrusão do bocal, e conseqüente tempo de permanência do material sobre aquecimento (BEHZADNASAB *et al.*, 2020).

Figura 2.19 Viscosidade complexa em uma escala logarítmica em função do inverso do tempo para PLA extrudado a diferentes temperaturas



Fonte: Behzadnasab *et al.*, (2020)

Enquanto isso, a temperatura da plataforma também pode afetar os atributos mecânicos e principalmente dimensionais dos componentes fabricados (SHEN *et al.*, 2022), atuando na redução das diferenças das distorções dimensionais do material das primeiras camadas e os recém depositados (ÇEVIK; KAM, 2020). Entretanto, esse conjunto de características são proeminentes em polímeros com coeficientes de dilatação térmico elevado e, conseqüentemente, não apresenta efeito significativo em polímeros como o PLA (BUTE *et al.*, 2022), e principalmente seus compósitos de fibra de carbono, que exibem coeficientes de expansão inferiores (ÇEVIK *et al.*, 2020).

- *Espessura de camada*

Este parâmetro pode influenciar as propriedades mecânicas das peças (CHACÓN *et al.*, 2017; ÇEVIK; KAM, 2020) e características superficiais (CASTILLO *et al.*, 2019; EILAT; URBARNIC, 2019), sendo o decréscimo da distância entre camadas o responsável pelo aumento da acuracidade dimensional e redução da rugosidade (EILAT; URBARNIC, 2019). Entretanto, a diminuição dessa espessura acarreta uma maior quantidade de camadas a serem depositadas e, em virtude disso, maiores tempos de fabricação (SCAFFARO *et al.*, 2021), além da possibilidade, em casos extremos, da geração de camadas com espessura muito reduzida, permitindo a distorção e/ou quebra para pequenas cargas aplicadas (CASTILLO *et al.*, 2019). Na Figura 2.14 é representada esquematicamente a espessura de uma camada em comparação com os filamentos depositados e espessura dos filamentos.



#### 2.2.4 Programas para geração do G-CODE da MA

Atualmente existe uma grande quantidade de *softwares* dedicados para MA, cada um deles com a sua própria área de atuação (PATEL *et al.*, 2021). Uma quantidade significativa desses aplicativos só disponibiliza todas suas funções mediante pagamento de licença (EILAT; URBANIC,2019), enquanto outros, além de serem gratuitos, permitem modificação e adição de *plug-ins* que permitem maior customização do projeto, sendo um dos principais exemplos o CURA<sup>®</sup> (PATEL *et al.*, 2021)

Em função da liberdade fornecida pelo *software* é possível escolher quais parâmetros podem ser aplicados ou alterados em um componente (EILAT; URBANIC, 2019), além da possibilidade de alterar seções específicas do componente (BIROSZ *et al.* 2023), na qual as escolhas devem ser condizentes com as necessidades de projeto e limitações da máquina (ARMILLOTTA, 2020; PATEL *et al.*, 2021).

Além disso, conforme apresentado por Wiberg *et al.* (2019), existe a possibilidade de obtenção de componentes diferentes aplicando os mesmos parâmetros em dois *softwares* distintos, podendo ocorrer devido a diferença de referenciamento, definição do início da geometria manufaturada ou definição da cinemática de deposição de material (WIBERG *et al.*, 2019).

Apesar da grande quantidade de *softwares*, existem diversas máquinas que só podem ser controladas por *softwares* específicos (EILAT *et al.*, 2019). Um exemplo é o *software* Cliever Studio<sup>®</sup>, criado especificamente para operar as máquinas CL1<sup>®</sup>, CL2Edu<sup>®</sup>, CL2 Pro<sup>®</sup> e CL2 Pro +<sup>®</sup>, sendo difícil a implementação de outros *softwares* nesses equipamentos. Assim, no caso específico desse conjunto de máquinas, a aplicação de outros *softwares* só pode ocorrer após modificação de componentes do hardware ou modificações nos arquivos de impressão após exportação do *software*.

#### 2.2.5 Aplicações da manufatura aditiva

Novas aplicações de MA estão sendo criadas constantemente em conjunto com o desenvolvimento de novos materiais e métodos. Esse recente aumento da utilização pode ser associado as novas exigências de mercado em conjunto do aumento da acessibilidade dos equipamentos necessário (NGO *et al.*,2018; MOHAMMADI *et al.*, 2023).

Além disso, o recente desenvolvimento de tecnologias da MA reduziu os custos associados da fabricação e, conseqüentemente, possibilitou suas aplicações para diversos setores. Entretanto, a complexidade associada a essa tecnologia, principalmente em relação aos parâmetros de fabricação, continua a ser um desafio para diversas áreas (NGO *et al.*, 2018; LEON *et al.*, 2019). De tal forma, a aplicação da MA está focada nos setores biomédico (ROBLES *et al.*, 2019; ARIF *et al.*, 2022), aeroespacial (NGO *et al.*, 2018; ŞIRIN *et al.*, 2023) e automotivo (YUAN *et al.*, 2019; ARIF *et al.*, 2022).

O setor biomédico apresentou uma das melhores recepções às tecnologias de MA (ROBLES *et al.*, 2019; MOETAZEDIAN *et al.*, 2020; ARIF *et al.*, 2022; TEDLA *et al.*, 2022), principalmente em função da elevada liberdade geométrica (MOETAZEDIAN *et al.*, 2020), biocompatibilidade dos materiais (ARIF *et al.*, 2022) e relativo baixo custo de fabricação quando comparado com metodologias tradicionais (TEDLA *et al.*, 2022). Esse conjunto de características se destaca ainda mais para fabricação de componentes de PLA por FFF, em que liberdade geométrica e preço reduzido da tecnologia de manufatura (AKHOUNDI *et al.*, 2023), aliada a biocompatibilidade do material (ARIF *et al.*, 2022), permite aplicações até então economicamente inviáveis.

Além disso, os projetos em MA facilitam a aplicação de texturas complexas, essenciais à utilização de implantes ortopédicos e odontológicos (ARMILLOTTA, 2020), conforme apresentado na Figura 2.20, em que é possível observar a complexidade geométrica disponibilizada pela técnica FFF, sendo que, a técnica proposta pelo autor Armillotta (2020) foi desenvolvida especificamente para simular aspectos superficiais complexos encontrados na natureza, como texturas ósseas.

Figura 2.20 Componente fabricado por FFF para exemplificar a complexidade das texturas geradas pela técnica



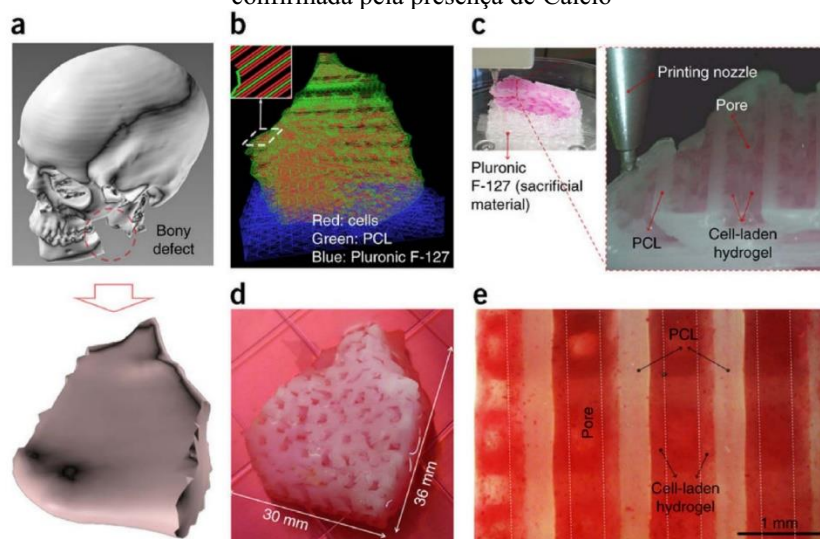
Fonte: Armillotta, (2020)

Aliás, a fabricação de implantes compósitos utilizando polímeros e materiais biológicos são temas de estudo de diversos trabalhos (BHARGAV *et al.*, 2018; NGO *et al.*,

2018; ROBLES *et al.*, 2019; MOETAZEDIA *et al.*, 2020; ARIF *et al.*, 2022). Todavia, essa evolução só foi possível devido ao desenvolvimento de novos polímeros e técnicas de processamento, além da otimização dos processos de associação de cálcio ou demais compostos biológicos aos polímeros (KANG *et al.*, 2016; NGO *et al.*, 2018; ARMILLOTTA, 2020). Um exemplo de inovação é apresentado na Figura 2.21, com a fabricação de uma prótese para um paciente com uma falha no osso da mandíbula.

Conforme apresentado na Figura 2.21 e exposto por Kang *et al.* (2016), nessa pesquisa foi utilizado uma tomografia computadorizada para identificação da anomalia e projeto da prótese, na segunda etapa foi aplicado um *software* de MA para traçar os caminhos de cada um dos materiais a serem depositados, células do paciente, polímero e *Pluronic F-127*. Após a definição das regiões de preenchimento, foi aplicada a deposição dos três materiais, enquanto na quarta etapa o componente foi exposto a osteogênica para cultura por 28 dias, sendo que ao final de todas as etapas é possível confirmar se a prótese está pronta para uso por meio da presença de cálcio no componente.

Figura 2.21 - Representação das principais etapas utilizadas para desenvolvimento de um prótese, (a) Modelo CAD contendo o defeito a ser analisado, (b) Distribuição das regiões de impressão, Verde, Azul e Vermelho como caminho do PLC, Pluronic F-127 e Hidrogel, respectivamente (c) Processo de MA, (d) Fotografia da peça utilizada para reparo da mandíbula após cultura em osteogênica por 28 dias, (e) Diferenciação osteogênica confirmada pela presença de Cálcio



Fonte: Kang *et al.*, (2016)

A aplicação da MA em próteses se torna possível devido a elevada liberdade de projetos e pluralidade de materiais aplicáveis, sendo essas características igualmente importantes em outras áreas (NGO *et al.*, 2018; PODROUŽEK *et al.*, 2019). Outro exemplo seria o setor aeroespacial e automotivo, cuja aplicações são comumente associadas a

necessidade de fabricação de componentes complexos, além da necessidade de utilizar peças com elevada resistência mecânica por massa (NGO *et al.*, 2018; TRZEPIECIŃSKI *et al.*, 2021), conforme apresentado na Figura 2.22, em que foi apresentado uma asa de um aeromodelo, componente de elevada complexidade e otimizado para apresentar a maior resistência mecânica por massa possível (YUAN *et al.*, 2019).

Figura 2.22 – Asa de aeromodelo fabricado por manufatura aditiva em corte.



Fonte: Yuan *et al.*, (2019)

Além disso, as desvantagens tradicionalmente associadas a MA, como o tempo de fabricação elevado (NGO *et al.*, 2018; TRZEPIECIŃSKI *et al.*, 2021) ou custo de obtenção dos equipamentos (NGO *et al.*, 2018; CASTILLO *et al.*, 2019), não são fatores limitantes nessa área, seja em função da quantidade de peças necessárias para produção, ou devido ao valor monetário elevado dos componentes fabricados (NGO *et al.*, 2018; TRZEPIECIŃSKI *et al.*, 2021), respectivamente.

Ademais, a aplicação da MA no setor automotivo, em especial o esportivo, aumentou de forma expressiva (CHANDGUDE *et al.*, 2021), no qual os principais motivos são análogos ao aeroespacial (TRZEPIECIŃSKI *et al.*, 2021), porém, com a adição da vantagem de fabricação de componentes sem necessidade de moldes (YUAN *et al.*, 2019), característica importante para geração de protótipos com tempo e custo reduzido (YUAN *et al.*, 2019; CHANDGUDE *et al.*, 2021). Um exemplo desse tipo de projeto é apresentado na Figura 2.23, em que é apresentado um protótipo de coletor de admissão fabricado para análise empírica do escoamento interno dos fluidos, em que esse coletor é apenas um dos possíveis componentes a serem fabricados por MA, sendo possível encontrar outros exemplos, como o para-choque, proteção do motor, peças do painel, além de diversos acessórios estéticos (CHANDGUDE *et al.*, 2021; SCAFFARO *et al.*, 2021).

Figura 2.23 – Protótipo de coletor de admissão fabricado para avaliação empírica do escoamento interno dos fluidos



Fonte: Yuan *et al.*, (2019)

### 2.2.6 Vantagens e desvantagens da manufatura aditiva

Todo processo de manufatura possui uma combinação única de vantagens e desvantagens e, para a maioria dos processos, esse conjunto está em constante evolução. Nas últimas décadas, a proporção de vantagens e desvantagens da MA modificaram de forma positiva (GUO *et al.*, 2013; PARANDOUSH *et al.*, 2017; NGO *et al.*, 2018; CASTILLO *et al.*, 2019; YUAN *et al.*, 2019; CHANDGUDE *et al.*, 2021; STEINMETZ *et al.*, 2022) e esse efeito pode ser visualizado por meio do aumento expressivo de trabalhos (NGO *et al.*, 2018; STEINMETZ *et al.*, 2022), patentes (CAFASSO *et al.*, 2020; CHANDGUDE *et al.*, 2021; STEINMETZ *et al.*, 2022) e empresas na área de MA (BIKAS *et al.*, 2016; YUAN *et al.*, 2019; CAFASSO *et al.*, 2020).

A MA é um termo utilizado para identificação de diversos processos com princípios físicos únicos, de tal forma que cada processo apresenta um conjunto singular de vantagens e desvantagens (ISO/ASTM 52900: 2021). Todavia, nessa seção será destacado as principais características das metodologias citadas na seção 2.2.1, ou seja, DED, PBF e MEX. Dentre esses aspectos, as principais vantagens são a capacidade de fabricação de componentes de alta complexidade, facilidade de customização dos projetos (BHARGAV *et al.*, 2018, NGO *et al.*, 2018; LEÓN *et al.*, 2019; PODROUŽEK *et al.*, 2019; STEINMETZ *et al.*, 2022), baixo custo de obtenção dos equipamentos, especialmente para tecnologias FFF (BIKAS *et al.*, 2016; NGO *et al.*, 2018; STEINMETZ *et al.*, 2022), capacidade de fabricação de componentes com materiais biocompatíveis e biológicos (PODROUŽEK *et al.*, 2019; STEINMETZ *et al.*, 2022) e capacidade de fabricação de estruturas multifuncionais (NGO *et al.*, 2018; CHANDGUDE *et al.*, 2021; STEINMETZ *et al.*, 2022). Além disso, o processamento por FFF é mais seguro em comparação com técnicas tradicionais de manufatura, principalmente por envolver

temperaturas de processamento inferior (ARIF *et al.*, 2022) e matéria prima em filamento (ARIF *et al.*, 2022; TEDLA *et al.*, 2022).

Em contrapartida as diversas vantagens citadas, ainda existem muitas limitações a serem superadas pelo processo citado, sendo que se destacam os problemas na regulamentação de processos e componentes específicos para MA, especialmente na alteração de parâmetros e tipos de falhas que devem invalidar o experimento (BHARGAV *et al.*, 2018; NGO *et al.*, 2018; CHANDGUDE *et al.*, 2021; SCAFFARO *et al.*, 2021; ARIF *et al.*, 2022), características mecânicas e superficiais inconsistentes com a modificação de parâmetros de forma simultânea (NGO *et al.*, 2018; CASTILLO *et al.*, 2019; MESSIMER *et al.*, 2019; STEINMETZ *et al.*, 2022), componentes fabricados com porosidade elevada em comparação aos processos tradicionais de manufatura e, além disso, a aplicação de materiais compósitos pode elevar a porcentagem de vazios (NGO *et al.*, 2018; YUAN *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2021; SCAFFARO *et al.*, 2021) e aumentar as características anisotrópicas nos componentes fabricados (YUAN *et al.*, 2019; SCAFFARO *et al.*, 2021), além de dificultar a obtenção de tolerâncias dimensionais e geométricas reduzidas (NGO *et al.*, 2018; CASTILLO *et al.*, 2019; TRZEPIECIŃSKI *et al.*, 2021).

Todavia deve ser considerado que, em função da vasta quantidade de materiais e estratégias de fabricação aplicadas, pode ser possível reduzir os efeitos desse conjunto de restrições em função de metodologias de manufatura singulares ou restrito a uma combinação de parâmetros específicos (BOURELL *et al.*, 2017; LEÓN *et al.*, 2019). Um exemplo pode ser feito do trabalho de Tian *et al.* (2016), em que PLA com fibra de carbono contínua foi processado por FFF, obtendo resistência mecânica maior ao tradicionalmente extrudado por essa metodologia, sendo essa resistência comparável à ligas de alumínio.

### 2.3 MANUFATURA SUBTRATIVA

Existe uma discrepância entre a quantidade de estudos realizados na usinagem de polímeros e seus compósitos em comparação a metais ou cerâmicas (CHEN *et al.*, 2021; KRODEL *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2022). Essa discrepância, aliada as novas aplicações emergentes (TRZEPIECIŃSKI *et al.*, 2021) e significativa divergência da resposta de vários polímeros aos mesmos parâmetros de fabricação, tornam essa área fértil ao desenvolvimento de diversas pesquisas (ÇEVİK; KAM, 2020).

O comportamento dos polímeros e seus compósitos ao processamento por corte é significativamente diferente dos tradicionais cortes de metais, principalmente na formação do

cavaco, forças de corte e calor associado (YANG *et al.*, 2022). Nesse sentido, essa complexidade pode aumentar de forma expressiva ao utilizar compósitos de matriz polimérica, em que as características anisotrópicas e comportamento não homogêneo se tornam os maiores desafios para MS (DU *et al.*, 2019; CHANDGUDE *et al.*, 2021).

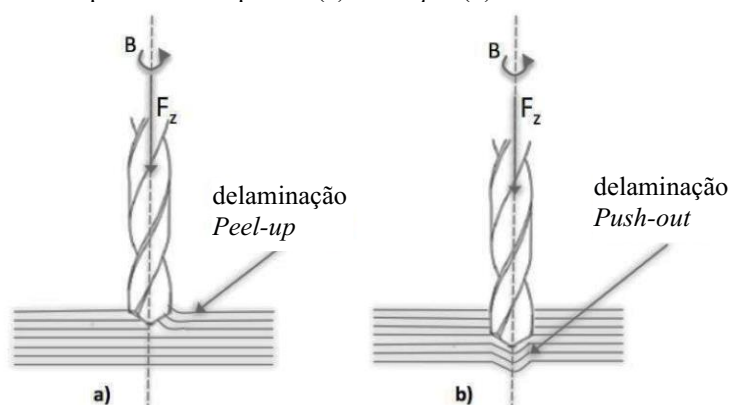
### 2.3.1 Processos de fabricação por manufatura subtrativa

Os processos de fabricação por MS podem ser classificados em convencionais e não convencionais, sendo que dentre os convencionais, os principais são a furação, fresamento, retificação e torneamento (RAJMOHAN, 2019). Todos esses processos apresentam características de fabricação únicas e, por conseguinte, são aplicados em funções específicas (HONARVAR *et al.*, 2020). Além disso, ao contrário da MA, na MS é relativamente comum a aplicação de mais de um processo subtrativo no mesmo componente caso seja necessário (DEJA *et al.*, 2020).

Um exemplo é o processo de furação, sendo esta uma das principais metodologias para geração de furos em componentes poliméricos e compósitos (JINGUANG *et al.*, 2019; HONARVAR *et al.*, 2020), principalmente em função da velocidade e qualidade das geometrias geradas (HONARVAR *et al.*, 2020). Todavia, os possíveis danos a integridade e qualidade superficial, em conjunto da elevada taxa de desgaste da ferramenta no processamento de compósitos são as principais limitações da aplicação da técnica (CAGGIANO, 2018; RAJ *et al.*, 2021).

Dentre as limitações da furação em componentes fabricados em camadas ou compósitos, a delaminação é um dos principais desafios a ser superado, sendo apresentados na Figura 2.24 dois exemplos de falhas, o *Peel-up* e *Push-out*, representado pela Figura 2.24 (a) e Figura 2.24 (b), respectivamente (CAGGIANO *et al.*, 2018). Esse tipo de defeito pode ser modificado em função dos parâmetros de corte, geometria da broca e forças envolvidas no corte (CAGGIANO *et al.*, 2018; HONARVAR *et al.*, 2020).

Figura 2.24 – Representação dos defeitos de delaminação ocasionado devido ao processo de furação de um polímero compósito. (a) *Peel-up* e (b) *Push-out*.



Fonte: Caggiano (2018)

Em oposição ao processo de furação, o fresamento é caracterizado pela liberdade geométrica superior, principalmente em comparação as demais metodologias de subtração convencionais (VIGNESHWARAN *et al.*, 2021). Além disso, esse processo se destaca pela qualidade da superfície gerada (DEJA *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2020), sendo esse um dos principais motivos da utilização dessa metodologia com função corretiva após MA (FERREIRA *et al.*, 2020; RAJ *et al.*, 2021).

Neste processo, a delaminação em conjunto com a formação de rebarba são os maiores desafios a serem superados para otimização das características superficiais e mecânicas dos componentes (RAJ *et al.*, 2021; HONARVAR *et al.*, 2020). No caso específico da manufatura de compósitos, os mesmos problemas são encontrados, porém outros desafios surgem, como a separação entre fibra e polímero, micro trincas na interface fibra/polímero (VIGNESHWARAN *et al.*, 2021) e elevado desgaste da ferramenta (CAGGIANO, 2018; FERREIRA *et al.*, 2020).

Em conjunto da utilização do fresamento para correção das tolerâncias e geometria externa (FERREIRA *et al.*, 2020), a aplicação de retificação também é responsável pela otimização dos acabamentos encontrados na literatura (DU *et al.*, 2019; RAJ *et al.*, 2021). Esse é um dos processos considerados insubstituíveis na usinagem de componentes de precisão, devido a qualidade superficial gerada e capacidade de processar materiais com dureza elevada (DU *et al.*, 2019).

Em função das vantagens citadas, muitas pesquisas estão sendo realizadas nos processos de retificação de polímeros (DU *et al.*, 2019), dentre elas as, forças envolvidas no processo (ZHU *et al.*, 2020), o mecanismo de remoção da fibra (RAJ *et al.*, 2021) e a qualidade superficial dos polímeros e compósitos se destacam (ZHU *et al.*, 2020; RAJ *et al.*, 2021). Os principais parâmetros modificados para otimização desse conjunto são o tipo de abrasivo,

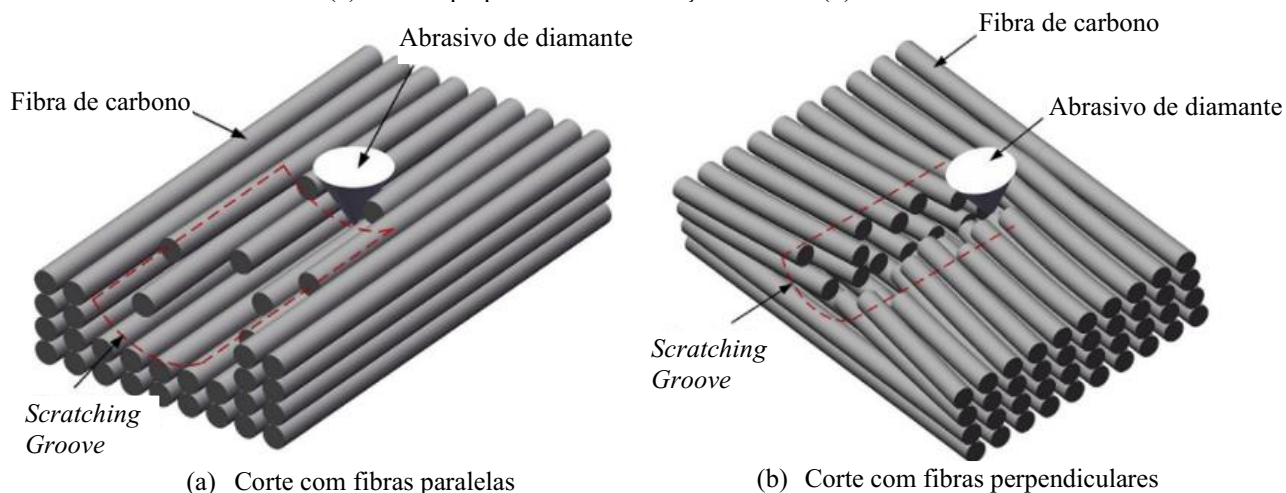


velocidade de corte (DU *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2020), velocidade de avanço e profundidade de corte (ZHU *et al.*, 2020; RAJ *et al.*, 2021).

Além disso, no processamento de materiais compósitos poliméricos deve ser considerado a estratégia de deposição de fibra utilizada, fator especialmente significativo na usinagem de compósitos com fibra contínua (Du *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). São representados esquematicamente na Figura 2.25 dois procedimentos de usinagem com todos os parâmetros iguais, exceto o direcionamento das fibras de carbono, em que essa única diferença modifica completamente o resultado gerado na subtração de material.

Ademais, no caso específico de peças que apresentem projeto com geometria simétrica-rotacional como tubos, eixos ou suporte de mancais, a técnica tradicionalmente utilizada é o torneamento (CAGGIANO, 2018; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021), sendo que, as principais ferramentas utilizadas na manufatura dos polímeros e seus compósitos são cerâmicas, nitreto de boro cúbico (CBN) (CHE *et al.*, 2014), metal duro (*cemented carbides*) (GUO *et al.*, 2021), diamante policristalino (*Polycrystalline Diamonds - PCD*), aço rápido (*High Speed Steel – HSS*) (CHE *et al.*, 2014; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021).

Figura 2.25 – Retificação de compósito polimérico com fibras de carbono com fibras paralelas a direção de corte (a) e fibras perpendiculares a direção de corte (b)



Fonte: Li *et al.*, (2019)

Além disso, os principais temas de estudo desse processo são a otimização da qualidade superficial em função dos parâmetros de usinagem (CHE *et al.*, 2014; CAGGIANO, 2018) em conjunto do aumento da vida da ferramenta (CHE *et al.*, 2014; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021). Os principais parâmetros de corte utilizados para otimizar o processo são a geometria da ferramenta (CAGGIANO, 2018; CHE *et al.*, 2014; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021),

profundidade de corte, velocidade de corte e avanço (CHE *et al.*, 2014; OLIVEIRA, 2020; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021).

Finalmente, na manufatura de polímeros e compósitos por torneamento existem diversos desafios, na qual os principais são a desassociação da fibra (*Pull-Out*), delaminação, degradação da matriz polimérica (CHEN *et al.*, 2021; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021), macrogeometria e microgeometria elevada (OLIVEIRA, 2020; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021). A utilização de ferramentas com dureza elevada é escolha tradicionalmente utilizada para redução da desassociação de fibra (CAGGIANO, 2018; CHEN *et al.*, 2021), e no caso específico em que se deseja apenas otimizar qualidade superficial, a diminuição da velocidade de avanço é metodologia mais simples de atuação (CAGGIANO, 2018; OLIVEIRA, 2020; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021).

### **2.3.2 Materiais utilizados na manufatura subtrativa**

Tradicionalmente, os materiais poliméricos, especialmente os injetados, são processados com a geometria/características finais do componente (BEHZADNASAB *et al.*, 2020), porém, em casos em que é exigido baixas tolerâncias dimensionais e geométricas, pode ser aplicada a usinagem dos componentes em uma etapa posterior (LÉON *et al.*, 2019, TALA *et al.*, 2020). Assim, o tipo de máquina, a ferramenta e os parâmetros utilizados devem ser escolhidos considerando as características químicas, físicas, reológicas e histórico térmico do polímero ou compósito (LÉON *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2021).

Neste contexto, é preciso considerar que o termo polímero é utilizado para referenciar diversos materiais com propriedades distintas (ÇEVIK; KAM, 2020) e, conseqüentemente, cada material necessita de condições de usinagem diferentes para otimização do processo (LÉON *et al.*, 2019). As principais características do polímero para avaliação das condições de usinagem são as propriedades mecânicas (ÇEVIK; KAM, 2020; CHEN *et al.*, 2021) e térmicas (JASMEE *et al.*, 2021). Além disso, entre os diversos tipos de polímeros, os termoplásticos se destacam por sua baixa usinabilidade em função do baixo módulo de elasticidade, elevada taxa de absorção de umidade e alto coeficiente de expansão térmico (CHABBI *et al.*, 2017; ÇEVIK; KAM, 2020).

Apesar das dificuldades, o conjunto de análise e aplicação correta dos parâmetros do processo permite usinar praticamente todos os polímeros comercialmente disponíveis (CHANDGUDE *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2021). Dentre todos esses materiais, os principais são o PLA (LANGAT *et al.*, 2021; NASER *et al.*, 2021), Policetal (CHABBI *et al.*, 2017),

Polietileno de ultra alto peso molecular (CHANDGUDE *et al.*, 2021), Poliéster, Caprolon (Poliamida 6), textolite, nylon (VANAT *et al.*, 2014), polietileno de baixa densidade, polietileno de alta densidade (CHEN *et al.*, 2021).

Ademais, a diversidade das características mecânicas, térmicas e reológicas dos compósitos é ainda superior aos encontrados nos polímeros (CHEN *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2021). Essa diversidade é amplificada pela quantidade de combinações possíveis entre matrizes poliméricas e fibras (RAJ *et al.*, 2021), além da estratégia de preenchimento das fibras (LI *et al.*, 2019).

### 2.3.3 Parâmetros de corte

Os processos subtrativos apresentam diversos parâmetros de controle e, dentre eles, os parâmetros de corte se destacam como essenciais na otimização das propriedades mecânicas e superficiais dos componentes usinados (YANG *et al.*, 2022), sendo seu efeito conhecido para os principais metais e cerâmicos comercializados (KISHAWY *et al.*, 2019). Todavia, apesar do conhecimento amplamente difundido do efeito da aplicação de cada parâmetro nos metais e cerâmicos, a mesma afirmação não pode ser realizada para os polímeros (CHABBI *et al.*, 2017; RAJ *et al.*, 2021).

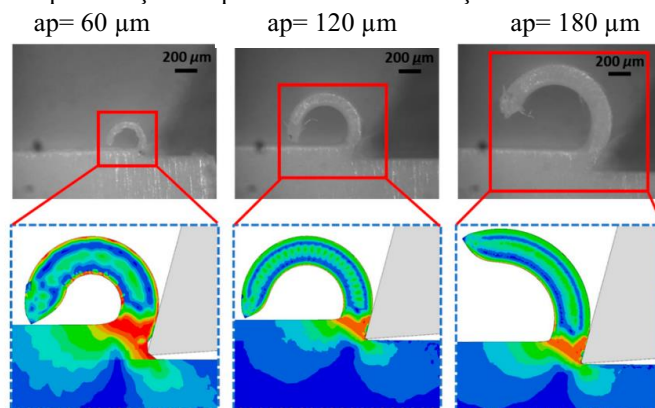
Além disso, em função da significativa discrepância das características físicas e químicas dos polímeros, a análise realizada para um material é dificilmente estendida para os demais, fator que torna a análise ainda mais desafiadora (ÇEVIK e KAM, 2020). Esses desafios são ainda superiores para análise de compósitos de matriz poliméricas, especialmente devido a possibilidade de geração de comportamentos únicos em função da combinação de matriz polimérica e aditivo, inviabilizando possíveis extrapolações de resultados (YANG *et al.*, 2022).

De tal forma, é preciso realizar a análise de diversos parâmetros de corte para otimização do processo de usinagem, dentre eles os principais pesquisados até o momento são a profundidade de corte ( $a_p$ ), penetração de trabalho ( $a_e$ ), avanço por dente ( $f_z$ ) e velocidade de corte ( $V_c$ ) (ERENKOV *et al.*, 2011; CHABBI *et al.*, 2017; LANGAT *et al.*, 2021; YANG *et al.*, 2022). Além dos parâmetros de corte, diversos outros parâmetros de controle também podem influenciar o processo de usinagem, dentre eles os principais são a geometria (OLIVEIRA, 2020), material e revestimento da ferramenta (CHABBI *et al.*, 2017; GUO *et al.*, 2021), fluido de corte e cinemática do processo (CORRAL *et al.*, 2021).

Dentre os parâmetros de corte, a profundidade de corte pode afetar o coeficiente de atrito, forças de corte, quantidade de material deformado (YANG *et al.*, 2022), rugosidade

(LANGAT *et al.*, 2021) e tipo de cavaco (VANAT *et al.*, 2014; OLIVEIRA, 2020). Assim, algumas dessas características podem ser observadas na Figura 2.26, em que é apresentado três profundidades de corte e seus respectivos cavacos gerados no processo, sendo que abaixo de cada imagem é apresentado o modelo de elementos finitos do corte realizado. Na mesma imagem, a escala de cores apresentada na figura utiliza tons de vermelho para representar elevadas taxas de deformação, e azul para regiões com pequenas distorções.

Figura 2.26 - Formação do cavaco em um polímero sobre corte ortogonal em diferentes profundidades de corte ( $a_p$ ) e as representações esquemáticas da deformação física ocasionada no processo



Fonte: Yang *et al.*, (2022)

Além disso, a profundidade de corte se destaca pela sua influência na energia térmica transferida no processo, característica esta significativa na usinagem de polímeros (YANG *et al.*, 2022), principalmente em função das reduzidas capacidades de dispersão térmica dos polímeros e seus compósitos (ÇEVIK e KAN, 2020), fator que pode gerar a adesão do cavaco no componente após a usinagem (OLIVEIRA, 2020).

Os valores comumente utilizados de profundidade de corte estão entre 60  $\mu\text{m}$  a 3 000  $\mu\text{m}$  (ERENKOV *et al.*, 2011; CHABBI *et al.*, 2017; LANGAT *et al.*, 2021; YANG *et al.*, 2022). A escolha desse parâmetro deve ser realizada considerando a rigidez da máquina, material e outros parâmetros utilizados no processo, como por exemplo, velocidade de corte ou avanço por dente (CHABBI *et al.*, 2017, OLIVEIRA, 2020).

Outro parâmetro significativo nas forças de corte é o avanço (WANG *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2021), sendo esse parâmetro especialmente importante nos resultados de rugosidade (CHABBI *et al.*, 2017; LANGAT *et al.*, 2021; NI *et al.*, 2022). Além disso, conforme apresentado por Slamani *et al.*, 2019, esse parâmetro pode influenciar desgaste da ferramenta de corte durante a usinagem de compósitos poliméricos com fibra de carbono contínua, enquanto o mesmo comportamento foi encontrado na usinagem de poliamida 12 com

fibra de carbono fragmentado (FERREIRA *et al.*, 2020), porém, na usinagem de compósitos com matriz de PEEK, não foi possível observar desgaste significativo (GUO *et al.* 2021). Além disso, para usinagem de PLA (OLIVEIRA, 2020) e poliamida puro (FERREIRA *et al.*, 2020) não foi observado modificações expressivas das características da ferramenta em função do avanço.

Outro efeito importante do avanço é sua influência na temperatura de corte na usinagem de polímeros (YANG *et al.*, 2022), característica esta significativa para o PLA extrudado por FFF, que apresenta modificações expressivas das propriedades mecânicas e físicas com aquecimento superior a 40 °C (GARCIA *et al.*, 2021). Esse aumento da temperatura é causado principalmente pela baixa condutividade térmica, e consequente dificuldade de dissipação de energia (JANEESH *et al.*, 2021), que é possivelmente um dos principais motivos da adesão de cavacos no componente após usinagem de PLA a valores elevados de avanço (OLIVEIRA, 2020).

A velocidade de avanço é uma consequência direta do avanço, além de ser comumente descrita em milímetros por minuto (CHABBI *et al.*, 2017; LANGAT *et al.*, 2021). A definição de programação por meio do avanço ou velocidade de avanço está comumente associada a metodologia de manufatura escolhida ou material (CHABBI *et al.*, 2017). Por exemplo, a usinagem de polímeros utiliza valores entre 0,02 e 0,24 mm/volta (CHABBI *et al.*, 2017; GUO *et al.*, 2021), e no caso específico de PLA, entre 0,05 e 0,15 mm/volta (OLIVEIRA, 2020). Além disso, o aumento da velocidade de avanço pode alterar a quantidade de calor transferido à peça por meio da modificação do cavaco formado, sendo que essa redução do calor transferido afeta positivamente na conservação química do material e tolerâncias geométricas da peça (LANGAT *et al.*, 2021).

A temperatura de usinagem também é afetada pela velocidade de corte (NI *et al.*, 2022), sendo que esse parâmetro também afeta na modificação das forças de corte (Ni *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2022) e rugosidade do componente processado (GUO *et al.*, 2021), porém, conforme apresentado por Oliveira (2020), na usinagem de PLA é um dos parâmetros menos influentes em comparação ao avanço e profundidade de corte, na alteração da força de corte e característica superficiais.

Esse parâmetro pode ser apresentado em função da velocidade tangencial ou rotação, sendo descrito em metros por minuto e rotações por minuto, respectivamente (CHABBI *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2022). No torneamento, os valores de velocidades são consequência da aplicação da rotação para um diâmetro da peça ou ferramenta conhecidos (SLAMANI *et al.*, 2019). Os principais valores para polímeros e seus compósitos são entre 15 e 90 m/min

(SLAMANI *et al.*, 2019; NI *et al.*, 2022). Para o PLA em específico, são utilizados valores entre 20 e 70 m/min (OLIVEIRA, 2020).

#### **2.3.4 Programas para geração do G-CODE da MS**

Os fabricantes de ferramentas disponibilizam cada vez mais *softwares* e aplicativos para auxiliar os usuários na definição dos parâmetros de usinagem e controle do processo (CAFASSO *et al.*, 2020), além de novas estratégias de manufatura (SELEMENEV *et al.*, 2021). Todavia, apesar da grande variabilidade de *softwares* disponíveis, sua seleção está diretamente vinculada ao maquinário selecionado, uma vez que alguns equipamentos só podem ser controlados por *softwares* específicos (FELDHAUSEN *et al.*, 2022), de forma análoga ao apresentado no tópico 2.2.4 desse trabalho.

Outro fator limitante é que a utilização desses *softwares* pode estar sujeita a pagamentos de taxas ou compartilhamentos de informações (FLYNN *et al.*, 2016; FELDHAUSEN *et al.*, 2022). Todavia, existem opções que não demandam desse conjunto de restrições, em que o LINUX CNC se destaca como uma das principais escolhas disponíveis (BREAZ *et al.*, 2020; PATEL *et al.*, 2021; DAI *et al.*, 2022), sendo caracterizado por ser *open source*, apresentar diversos modos de controle permitindo controle total do processo e compatibilidade em uma vasta quantidade de máquinas (PATEL *et al.*, 2021).

A aplicação desse *software* só pode ser realizada em um computador com sistema operacional LINUX (BREAZ *et al.*, 2020), porém existe a possibilidade de utilizar computadores virtuais para utilização do *software*, sendo necessário apenas modificar o sistema operacional durante o período de uso (PATEL *et al.*, 2021).

#### **2.3.5 Aplicação da manufatura subtrativa**

O aumento da utilização de componentes com tolerâncias dimensionais e geométricas reduzidas, em conjunto da necessidade de elevada relação de resistência mecânica por massa, possibilitaram novas funcionalidades para MS de polímeros e compósitos (DU *et al.*, 2019). Essas características, em conjunto com o baixo preço e tempo de fabricação favoreceram a expansão da aplicabilidade de usinagem em polímeros e seus compósitos (PALANIYANDI, 2018; RAWAL *et al.*, 2022), sendo que, dentre eles os principais são aeroespaciais (AAMIR *et al.*, 2019) e automotivo (YUAN *et al.*, 2019; CHANDGUDE *et al.*, 2021)

A capacidade de fabricação de componentes com elevada relação de resistência por massa torna os polímeros e seus compósitos ideais para o setor aeroespacial (AAMIR *et al.*, 2019; KARATAŞ *et al.*, 2018), sendo esse aumento significativo nas últimas duas décadas (DU *et al.*, 2019). De tal forma, a utilização desses materiais aumentou, por exemplo, inicialmente igual a 5 % do peso total no Boeing 767<sup>®</sup> introduzido em 1982 (AHMAD *et al.*, 2009) para uma porcentagem em massa superior a 50 % no Boeing 767, 787 e Airbus A350 e A380 (AAMIR *et al.*, 2019).

Os principais dispositivos compósitos e poliméricos utilizados nas aeronaves são latas de lixo, piso, portas, componentes da asa, fuselagem e radome, sendo que uma quantidade significativa desses dispositivos necessita de usinagem para atendimento dos requisitos de projeto (AAMIR *et al.*, 2019) ou fixação a outros componentes (KESARWANI *et al.*, 2023). Além disso, os compósitos poliméricos não estão limitados a fibras de carbono contínuas ou fragmentadas, pois existem componentes que são fabricados com fibra de vidro e aramida, como por exemplo a caixa de aletas do estabilizador vertical e radome posicionado na região frontal do avião, respectivamente (AAMIR *et al.*, 2019).

De forma análoga ao setor aeroespacial, o setor automotivo apresentou aumento na utilização de polímeros e seus compósitos (VINAYAGAMOORTHY *et al.*, 2019; CHANDGUDE *et al.*, 2021; RAWAL *et al.*, 2022), sendo que no passado, a utilização de metais e cerâmicos foi mais difundida em função das boas propriedades mecânicas e físicas, aliada ao amplo conhecimento das técnicas de manufaturas aplicáveis nesses materiais (CHANDGUDE *et al.*, 2021). Entretanto, esse cenário foi modificado, principalmente em relação as propriedades dos polímeros e as possíveis metodologias de manufatura disponíveis ao processamento de material (ISMAIL *et al.*, 2016; VINAYAGAMOORTHY *et al.*, 2019; CHANDGUDE *et al.*, 2021; RAWAL *et al.*, 2022).

Além disso, o aumento da aplicação de polímeros também pode ser correlacionado com o baixo custo de fabricação, aliado a flexibilidade e viabilidade ambiental (CHANDGUDE *et al.*, 2021), fatores significativos para as demandas atuais (ARIF *et al.*, 2022, TEDLA *et al.*, 2022). No setor automotivo, essas aplicações dos polímeros e seus compósitos podem ocorrer em diversos componentes, como a barra anti-rolagem, para-choque automotivo, pedal de freio, arco da roda, escudo do motor (CHANDGUDE *et al.*, 2021) e coletor de admissão (VIGNESHWARAN *et al.*, 2021).

### 2.3.6 Vantagens e desvantagens da manufatura subtrativa

A MS é uma classificação utilizada para diversos processos desde a furação, fresamento, retificação a torneamento (DU *et al.*, 2019; DANDEKAR *et al.*, 2012; CHANDGUDE *et al.*, 2021; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021). Cada um desses processos apresenta um conjunto único de vantagens e desvantagens, sendo que esse conjunto pode ser modificado em função dos tipos de materiais a serem utilizados no processo (DU, 2019) ou parâmetros de controles aplicados (CHANDGUDE *et al.*, 2021; VIGNESHWARAN *et al.*, 2021).

O aumento da aplicação da MS de compósitos e polímeros está correlacionado com suas diversas vantagens (VINAYAGAMOORTHY *et al.*, 2019; CHANDGUDE *et al.*, 2021; RAWAL *et al.*, 2022), sendo que esses benefícios são frutos de diversas pesquisas, modificações das necessidades econômicas (CHANDGUDE *et al.*, 2021), e principalmente evolução das estratégias aplicadas para manufatura (RAWAL *et al.*, 2022).

Dentre essas vantagens, as principais são o baixo tempo de processamento ativo em relação as demais técnicas de manufatura (RAWAL *et al.*, 2022), capacidade de fabricação com tolerâncias geométricas e dimensionais mais estreitas, elevada qualidade superficial (KARATAŞ *et al.*, 2018; OLIVEIRA, 2020; GUO *et al.*, 2021), taxa de desgaste da ferramenta de corte reduzida para polímeros e em alguns compósitos (FERREIRA *et al.*, 2020; OLIVEIRA, 2020; GUO *et al.*, 2021), capacidade de processar diversos tipos de materiais (BEHZADNASAB *et al.*, 2020; ÇEVİK e KAM, 2020; CHEN *et al.*, 2021) e capacidade de automatização do processo (FLYNN *et al.*, 2016; PATEL *et al.*, 2021; FELDHAUSEN *et al.*, 2022).

Todavia, apesar das diversas vantagens da aplicação de MS, ainda existem alguns desafios que limitam a ampliação de empregabilidade de polímeros em alguns setores. Esses fatores são afetados pela escolha do material e parâmetros de processo escolhidos para processamento. Algumas características podem ser citadas, porém as principais são a possibilidade de delaminação de compósitos (CAGGIANO, 2018; RAJ *et al.*, 2021), taxa de desgaste elevada para processamento de alguns compósitos (FERREIRA *et al.*, 2020; KARATAŞ *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019), especialmente para materiais com fibra contínua (KARATAŞ *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019), baixa produtividade para fabricação de alguns compósitos (CHANDGUDE *et al.*, 2021; KESARWANI *et al.*, 2023), possibilidade de geração de trincas internas no processamento (RAJMOHAN *et al.*, 2019), poucos bancos de dados disponíveis para análise de informações do processo (VIGNESHWARAN *et al.*, 2022;



FELDHAUSEN *et al.*, 2022) e dificuldade em lidar com alguns tipos de cavacos (OLIVEIRA, 2020).

## 2.4 MANUFATURA HÍBRIDA

A MS é capaz de oferecer elevada qualidade superficial (Li *et al.*, 2019) e tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas (FERREIRA *et al.*, 2020; OLIVEIRA, 2020; GUO *et al.*, 2021), porém esse processo é comumente associado a limitações de projeto (CHANDGUDE *et al.*, 2021; KESARWANI *et al.*, 2023). Em contrapartida, a MA é capaz de fabricar componentes com elevada complexidade geométrica utilizando diversos tipos de materiais (SALONITIS *et al.*, 2016; YUAN *et al.*, 2019; CHANDGUDE *et al.*, 2021; STEINMETZ *et al.*, 2022), porém, apesar da constante evolução das metodologias aditivas, permanecem limitações da qualidade superficial dos componentes produzidos por essa metodologia (YUAN *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2021; SCAFFARO *et al.*, 2021).

Consequentemente, diversas pesquisas são realizadas para superar essas limitações, sendo que a “hibridização” de duas ou mais metodologias é uma das melhores propostas de solução dessas barreiras (FLYNN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2018; HE *et al.*, 2023). Todavia, apesar das diversas vantagens da aplicação de máquinas híbridas (GUO *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023), a complexidade envolvida no projeto é significativa, especialmente na escolha dos parâmetros de controle, sendo essa uma das principais limitações de aplicação de projetos/máquinas híbridas (FLYNN *et al.*, 2016; CHONG *et al.*, 2018; DU *et al.*, 2018; GUO *et al.*, 2021).

### 2.4.1 Conceitos de manufatura híbrida

A terminologia híbrida pode ser utilizada com diferentes significados. De acordo com Lauwers *et al.*, 2014 e ZHU *et al.*, 2013 o termo híbrido é comumente associado a três conceitos: a combinação de diferentes tipos de energias na zona de processamento, combinação de etapas que geralmente são realizadas em processos diferentes ou a combinação e integração de processos em apenas uma máquina.

Uma das principais definições de processos híbridos de manufatura foi proposta por Lauwers *et al.* (2014, p. 561) na seguinte afirmação: “*Hybrid manufacturing processes are based on the simultaneous and controlled interaction of process mechanisms and/or energy*

*sources/tools having a significant effect on the process performance.*”. Segundo os pesquisadores, os processos de fabricação híbrido são baseados na interação simultânea e controlada de mecanismos de processos e/ou fontes de energia/ferramentas com significativo efeito no desempenho do processo.

Desse modo, muitos procedimentos podem envolver duas ou mais metodologias distintas para fabricação, e ainda não serem consideradas híbridas (FLYNN *et al.*, 2014). A manufatura híbrida em sua plena aplicação é consequência de processos aplicados de forma simultânea ou com tempos significativamente reduzidos entre alternância dos processos (FLYNN *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2023). Conseqüentemente, diversos trabalhos que utilizaram a MS após MA não são considerados completamente híbridos e, dentre eles, os principais já citados são do Oliveira, (2020), Guo *et al.*, (2021) e Wang *et al.*, (2022). Em oposição, as pesquisas que apresentaram aplicação simultânea dos múltiplos processos de fabricação e, por conseguinte, manufatura híbrida, foram as pesquisas de Jonušauskas *et al.*, (2017), Sun *et al.*, (2018), Zhang *et al.*, (2019) e Li *et al.*, (2021).

Por fim, na próxima seção serão abordadas as principais metodologias que são tradicionalmente utilizadas para hibridização, sendo que alguns dos resultados apresentados foram originados de pesquisas que não utilizaram máquinas híbridas em seu pleno conceito, porém, conforme citado pelos respectivos autores, apresentaram uma perspectiva híbrida aos problemas e oportunidades encontrados.

#### **2.4.2 Máquinas e processos híbridos**

De acordo com Zhu *et al.* (2013), as técnicas tradicionais de manufatura podem ser classificadas em cinco grandes grupos tecnológicos referenciados como união, divisão, transformação, subtração e adição. Nesse contexto, a manufatura híbrida pode ser aplicada pela combinação de técnicas do mesmo grupo, ou associação de grupos diferentes, sendo as principais combinações: (a) processos híbridos de manufatura subtrativa (*hybrid subtractive manufacturing processes- HSMP*), (b) processos híbridos de manufatura de transformação (*hybrid transformative manufacturing processes - HTMP*), (c) processos híbridos de manufatura aditiva (*hybrid additive manufacturing processes - HAMP*), (d) processos híbridos de manufatura de união e subtração (*hybrid union and subtractive manufacturing processes - HUSMP*), (e) processos híbridos de manufatura aditiva e de transformação (*hybrid additive and transformative manufacturing processes - HATMP*), (f) processos híbridos de manufatura de subtração e transformação (*hybrid subtractive and transformative manufacturing processes -*

*HSTMP*) e (g) processos híbridos de manufatura aditiva e subtrativa (*hybrid additive and subtractive manufacturing processes - HASMP*) (ZHU *et al.* 2013). A integração de cada um desses processos requer um processamento de dados único, sendo necessário considerar as influências individuais e combinadas dos parâmetros dos processos (CHONG *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; HARABIN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023).

Dentre os diversos grupos citados, será apresentado uma breve revisão bibliográfica dos processos híbridos de manufatura aditiva e subtrativa (HASMP) com destaque para as técnicas aditivas fabricação por filamento fundido (FFF), fusão em leito de pó (PBF) e deposição por energia direcionada (DED), além das subtrativas de fresamento, furação e torneamento.

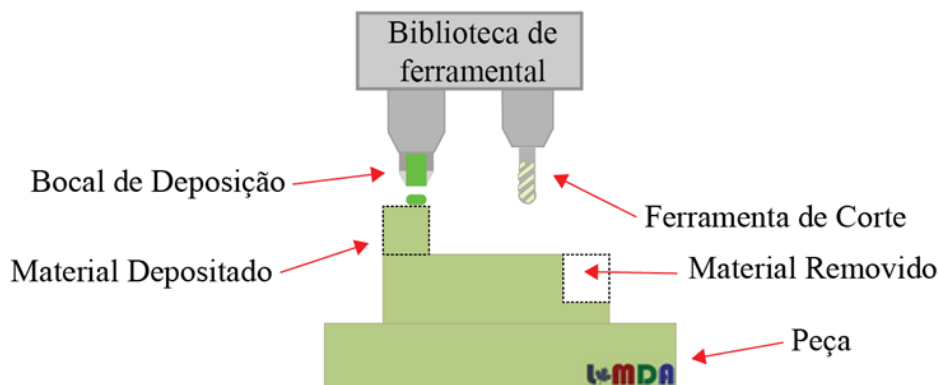
- *FFF e usinagem*

A combinação de resistência química, estabilidade térmica, simplicidade de utilização, elevada resistência mecânica por massa e custo reduzido são as principais características dos termoplásticos (TP) utilizados na FFF (NGO *et al.*, 2018; GUO *et al.*, 2021). Todavia, apesar da constante evolução desse processo, alguns desafios permanecem, dentre eles a busca por melhor qualidade superficial e tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas, (OLIVEIRA, 2020; GUO *et al.*, 2021) além do aumento da taxa de processamento sem comprometer o desempenho mecânico do componente impresso (ZHENG e AHMAD, 2020; GUO *et al.*, 2021).

A hibridização do FFF com a usinagem proporciona uma melhoria das tolerâncias dimensionais e geométricas (OLIVEIRA, 2020), porém, conforme apresentado por Li *et al.*, 2019, é necessária uma análise combinatória dos parâmetros aditivos e subtrativos para otimização dos resultados, principalmente das características superficiais. Além disso, a utilização de compósitos pode aumentar ainda mais a complexidade da análise (GUO *et al.*, 2021), porém, sua utilização pode ser exigida em função da necessidade de melhores propriedades térmicas, elétricas e mecânicas dos componentes (SCAFFARO *et al.*, 2021).

Um exemplo de estação de trabalho utilizando a FFF e fresamento no contexto híbrido é representado esquematicamente na Figura 2.27. É possível, conforme apresentado por Zheng e Ahmad (2020), utilizar usinagem a qualquer momento posterior a deposição, porém o planejamento deve ocorrer para evitar colisão entre o bocal de extrusão e a ferramenta de corte, assim como entre o bocal e a peça (ZHENG e AHMAD, 2020; HARABIN *et al.*, 2022).

Figura 2.27 - Representação esquemática de estação de trabalho de uma máquina híbrida associando FFF e fresamento



Fonte: Adaptado de Zheng e Ahmad (2020)

Conforme apresentado por Harabin *et al.*, (2022), nos casos em que não é possível realizar a subtração de material até que toda adição já tenha sido realizada, a liberdade de projeto desejada na manufatura híbrida é significativamente afetada. Todavia, a aplicação desses casos ainda apresenta utilidade, principalmente nos casos em que o objetivo final seja apenas otimização das tolerâncias dimensionais (OLIVEIRA, 2020; GUO *et al.*, 2021) e geométricas de regiões com geometrias simples e de fácil acesso (OLIVEIRA, 2020)

- *PBF e usinagem*

Conforme apresentado no tópico 2.2.1, o processo fusão em leito de pó (PBF) utiliza finas camadas de pó como matéria prima e, em virtude disso, viabiliza o processamento de diversos materiais por essa técnica (PLOTKOWSKI *et al.*, 2021). Todavia, conforme exposto por Tan *et al.*, (2020), a otimização do processo ainda é afetada pelos aspectos reológicos do insumo, dificultando, mas não inviabilizando a aplicação da técnica em alguns materiais.

Aliada a diversidade de insumo, essa técnica apresenta uma elevada liberdade geométrica e qualidade superficial em comparação as demais técnicas aditivas (WANG *et al.*, 2023), de tal forma que, em função dessas vantagens, muitos trabalhos têm sido realizados na área (FELDHAUSEN *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2023), inclusive na capacidade de hibridização do processo com metodologias subtrativas (PLOTKOWSKI *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2023). Todavia, apesar da liberdade inerente do processo, a transmissão dessas características ao processamento híbrido pode ser complexa, principalmente em função das

limitações do acesso da ferramenta de corte a superfícies laterais e inferiores da peça (FLYNN *et al.*, 2021).

Essas limitações ocorrem devido a presença de insumo não fundido na região de trabalho, sendo esse pó uma característica inerente do processo (PLOTKOWSKI *et al.*, 2021). Entretanto, conforme apresentado por Wang *et al.*, (2022), existe a possibilidade da retirada do insumo para realização da usinagem nas regiões desejadas, mas continua necessária a posterior reposição do pó para utilização como suporte para nova camada. Todo esse processo precisa ser realizado em cada alternância da subtração e adição, gerando um tempo de processamento elevado, porém permitindo aplicação da hibridização em seu pleno conceito.

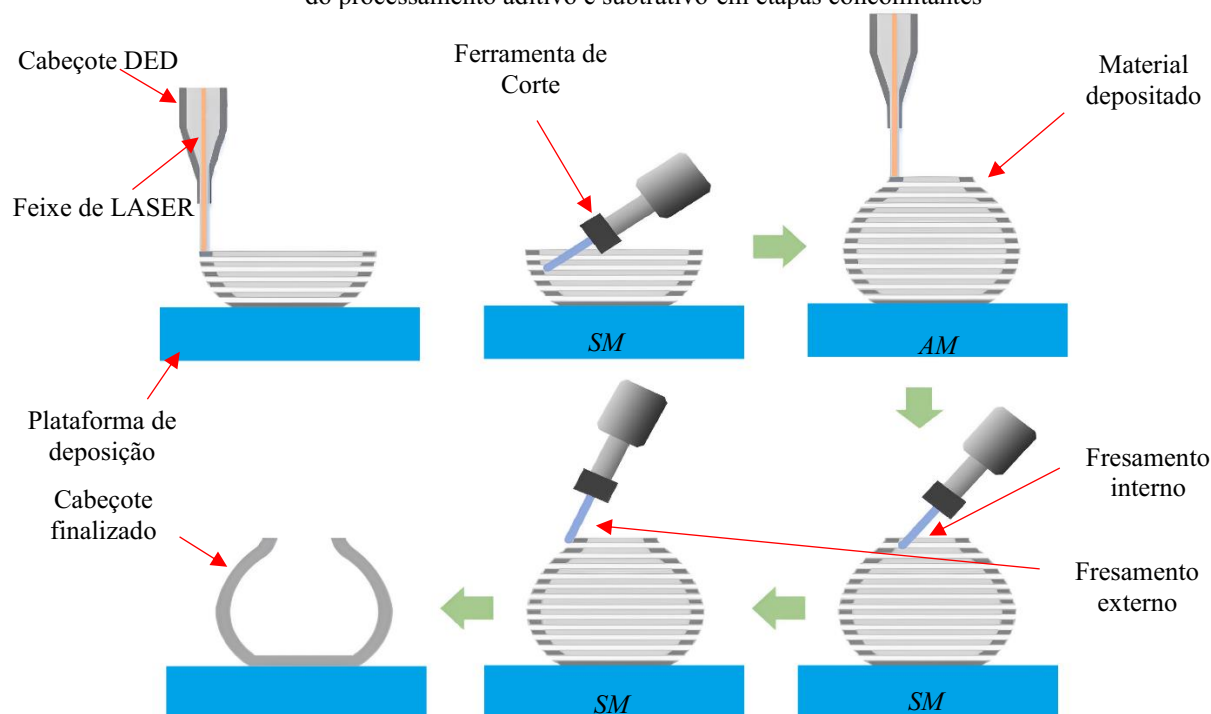
- *DED e usinagem*

Conforme apresentado no tópico 2.2.1, a deposição por energia direcionada (DED) é realizada por meio da deposição de pó exclusivamente na região em que deve ocorrer a fusão (DEZAKI *et al.*, 2022; FELDHAUSEN *et al.*, 2022), sendo que essa fusão pode ser realizada por diversas fontes térmicas, como LAZER (CHONG *et al.*, 2018; GONG *et al.*, 2019; HODONOU *et al.*, 2019), feixe de elétrons (FELDHAUSEN *et al.*, 2022) ou arco elétrico (AMANULLAH *et al.*, 2017; CHONG *et al.*, 2018; FELDHAUSEN *et al.*, 2022).

Além disso, a fonte de energia térmica e equipamentos de deposição do insumo são comumente movimentados por um braço robótico, sendo essa escolha realizada para aumentar a liberdade de fabricação do projeto (FELDHAUSEN *et al.*, 2022). Em função disso, as tentativas de hibridização desse processo são comumente realizadas pela adição de uma ferramenta de corte a um braço mecânico (SUN *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2021), sendo utilizado o mesmo braço no processamento aditivo, ou uma extensão robótica completamente diferente (SUN *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2021), porém com a mesma área de trabalho (ZHANG *et al.*, 2019).

Um exemplo da manufatura híbrida realizada em intervalos concomitantes entre deposição e subtração é representado esquematicamente na Figura 2.28, sendo utilizado uma fonte de LAZER e fresamento como metodologias de fusão e subtração de material, respectivamente. Nessa representação realizada por Liu *et al.*, 2021 é apresentada a possibilidade de usinagem de uma superfície interna, em que o acesso é possível apenas em processos com concomitância, além da aplicação de ferramentas de corte com elevado grau de liberdade.

Figura 2.28 – Representação esquemática da manufatura híbrida (MH) de um componente por meio da aplicação do processamento aditivo e subtrativo em etapas concomitantes



Fonte: Liu *et al.*, (2021)

Ademais, essa técnica pode ser considerada como uma das primeiras associada a MS, sendo que os primeiros protótipos datam de a mais de duas décadas e um dos primeiros trabalhos publicados foram realizados por Jeng e Lin, (2001) que avaliaram a produção de moldes para injeção, e devido aos requisitos dimensionais insuficientes do DED para fabricação do componente, foi aplicada a hibridização da máquina para atendimento do projeto. Posteriormente, tal técnica evoluiu para aplicação de DED a LASER com uma fresadora de cinco eixos, e conseqüente maior liberdade de projeto, sendo esse publicado por Zhang *et al.*, (2004).

Atualmente, os principais temas de pesquisas são direcionados na otimização das estratégias de manufatura por meio do controle e aperfeiçoamento da integração dos processos aditivos e subtrativos (CHONG *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019; ROSSI e LANZETTA, 2020; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; HARABIN *et al.*, 2022), além da qualidade superficial (LIU; TO, 2017; ZHANG *et al.*, 2019; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; HARABIN *et al.*, 2022) e redução do tempo de processamento (CHONG *et al.*, 2018; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; HARABIN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023).

### 2.4.3 Parâmetros de controle dos processos híbridos

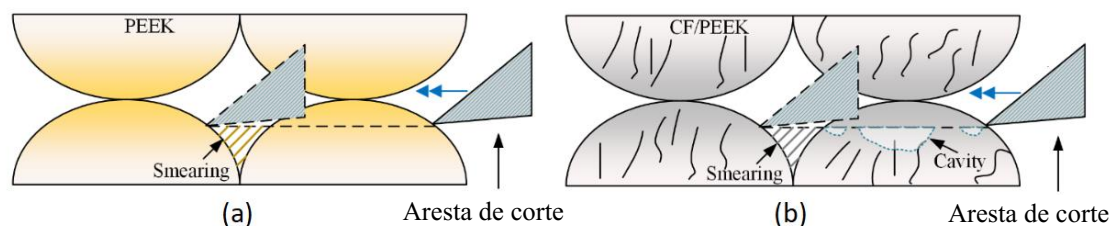
Os parâmetros utilizados nos processos híbridos são compostos pelo somatório dos parâmetros de cada processo em conjunto com as possíveis combinações (FLYNN *et al.*, 2016; FELDHAUSEN *et al.*, 2022). De tal forma, uma porção significativa dos parâmetros já foram abordados nos tópicos 2.2.3 e 2.3.3.

Existe uma quantidade significativa de parâmetros de controle aplicados na manufatura híbrida (SCAFFARO *et al.*, 2021; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023), sendo que, em função da quantidade de combinações desses parâmetros, a análise do efeito combinatório de todas as possibilidades pode se tornar inviável (FELDHAUSEN *et al.*, 2022). Entretanto, por meio da literatura, é possível reduzir para as combinações que apresentam efeito significativo nas propriedades mecânicas (AKULA *et al.*, 2006; FLYNN *et al.*, 2016; FELDHAUSEN *et al.*, 2022), físicas (ZENG *et al.*, 2022) ou superficiais dos corpos de prova (OLIVEIRA, 2020; GUO *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021).

De tal forma, as principais combinações, em função das características superficiais, são o ângulo de deposição, espessura de camada (GUO *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021) da MA associado com velocidade de corte, profundidade de corte e avanço (OLIVEIRA, 2020; GUO *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021) da MS. Além disso, em adição aos parâmetros aditivos e subtrativos, existem aqueles que se manifestam em função do hibridismo do processo, sendo o tempo mínimo entre adição e subtração de material um dos principais (WANG *et al.*, 2023)

Além da combinação dos parâmetros, também é necessário considerar a influência do material utilizado, uma vez que o tipo, polímero ou compósito (FERREIRA *et al.*, 2020; GUO *et al.*, 2021), morfologia da matriz e estratégia de aplicação das fibras influenciam significativamente o efeito dos parâmetros (GUO *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2019). Esse problema é exemplificado pelos autores Gou *et al.*, (2021) que realizam a comparação da rugosidade em função da modificação de diversos parâmetros da MA e MS em polímeros e compósitos, em que os principais valores alterados foram o avanço, velocidade de corte e direção de deposição do filamento. Por fim, foi possível observar a atenuação das ondulações naturalmente ocasionadas pela FFF, sendo essa redução gerada em função da deformação de material recém usinado na região, conforme apresentado na Figura 2.29.

Figura 2.29 Representação esquemática da subtração de material de peças fabricadas por meio da FFF do material PEEK (a) e PEEK com fibra de carbono fragmentada (b)



Fonte: Guo *et al.*, (2021).

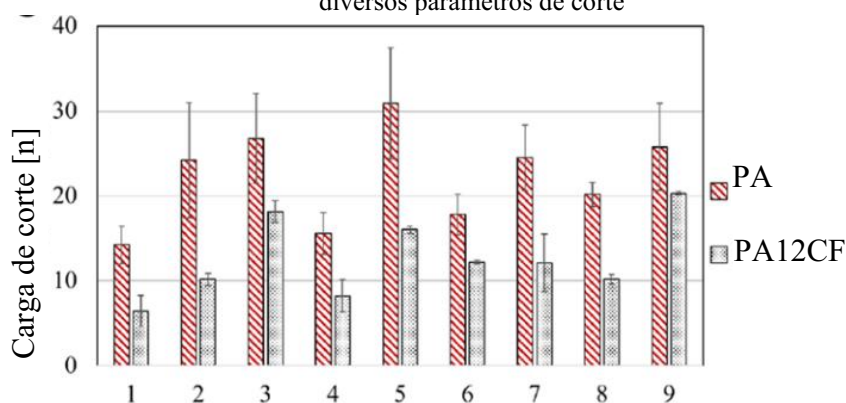
Nesse estudo também foi possível verificar a proporcionalidade direta entre a taxa de avanço e rugosidade, todavia, esse efeito é distinto para polímeros e compósitos, sendo a justificativa dessas alterações realizada em função da modificação das propriedades mecânicas com adição das fibras de carbono, especialmente o aumento da fragilidade e diminuição da deformação máxima, características que possivelmente modificou o mecanismo de corte (GUO *et al.*, 2021).

Conforme proposto pelos autores Guo *et al.*, (2021) e apresentado na Figura 2.29, a adição de fibras de carbono induz a ocorrência de corte por microtrincamento, na qual esse é o principal responsável pelo incremento da rugosidade para peças extrudadas com fibras de carbono. Todavia, os autores Ferreira *et al.*, (2020) não encontraram diferença significativa na rugosidade de polímeros e compósitos extrudados por FFF após usinagem, essa diferença é provavelmente ocasionada pela matriz divergente aplicada pelos autores, sendo poliamida no trabalho de Ferreira *et al.*, (2020) e PEEK em Guo *et al.*, (2021), enquanto ambos utilizaram fibras de carbono como adição.

Apesar dos autores Ferreira *et al.*, (2020) não terem encontrado diferenças nas características superficiais na usinagem da poliamida e poliamida com fibra de carbono, foi possível encontrar alterações nas forças de corte em função da adição da fibra de carbono, sendo que é possível observar uma redução da força com adição das fibras, conforme apresentado na Figura 2.30. Essa redução foi observada na alteração de todos os parâmetros, conforme os códigos apresentados no Quadro 2.3.



Figura 2.30 Força de corte para Poliamida12 (PA12) e Poliamida12 com fibra de carbono (PA12CF) para diversos parâmetros de corte



Fonte: Ferreira *et al.*, (2020)

Quadro 2.3 Lista de condições e respectivos parâmetros utilizados na usinagem de poliamida e poliamida com fibra de carbono

Condição	Velocidade de corte (Vc) [m/min]	Avanço (f) [mm/volta]	Profundidade de corte (ap) [mm]
1	100	0,010	0,6
2	100	0,035	0,8
3	100	0,070	1,0
4	200	0,010	0,6
5	200	0,035	0,8
6	200	0,070	1,0
7	300	0,010	0,6
8	300	0,035	0,8
9	300	0,070	1,0

Fonte: Ferreira *et al.*, (2020)

Ademais, o direcionamento das fibras adicionadas também pode influenciar as forças resultantes, sendo observado um aumento expressivo da força de avanço em componentes fabricados com fibras deslocadas em 90° em relação a direção de avanço, enquanto a velocidade de corte não apresentou modificação em função dessas alterações do ângulo (WAN *et al.*, 2019).

Finalmente, a aplicação da MH pode resultar em tempos de produção reduzidos (LIU *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018). Essa vantagem está disponível em função da maior produtividade ocasionada pela deposição com espessura de camadas maiores e, posterior correção por subtração de material (SUN *et al.*, 2018, LI *et al.*, 2018). Essa vantagem apresenta efeito amplificado nos casos em que é aplicado ferramentas de elevado grau de liberdade, possibilita acesso a regiões de difícil acesso e, conseqüentemente, diminui alterações de ferramentas (LI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018)

#### 2.4.4 Programas para geração do G-CODE da MH

O planejamento da fabricação dos componentes por MH é realizado considerando três características essenciais, como a identificação da orientação de fabricação aplicável, a decomposição da geometria do componente em uma representação por camadas e a definição da sequência de processos necessária para realizar a manufatura do componente (FLYNN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2018; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023).

A geração desse planejamento pode ser auxiliada por diversas metodologias de otimização, como a compensação de dilatação térmica, modificação do tempo entre camadas para reduzir modificações das propriedades mecânicas e físicas (FLYNN *et al.*, 2016; FELDHAUSEN *et al.*, 2022), definição de etapas para limpeza do componente objetivando facilitar acesso da ferramenta de corte (WANG *et al.*, 2023). Esses desenvolvimentos podem ser realizados durante a etapa aditiva, subtrativa ou simultaneamente (FLYNN *et al.*, 2016; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023). Todavia, em função da dificuldade de simulação (TIPTON *et al.*, 2021), uma quantidade significativa de resultados ainda é de origem empírica (LI *et al.*, 2019; ROSSI e LANZETTA, 2020; WANG *et al.*, 2023).

Uma opção viável para definição dessa estratégia de manufatura é a aplicação de algum *software* dedicado a MH (FLYNN *et al.*, 2016; FELDHAUSEN *et al.*, 2022), porém, conforme apresentado por Flynn *et al.*, (2016), uma quantidade significativa dessas ferramentas é vinculada a algum tipo de equipamento ou subscrição. Além disso, em alguns programas, não é disponível o código base responsável pela definição de uma estratégia (FLYNN *et al.*, 2016; PATEL *et al.*, 2021) e, por conta disso, dificulta qualquer tipo de comparação de resultados entre um aplicativo e demais concorrentes (FLYNN *et al.*, 2016).

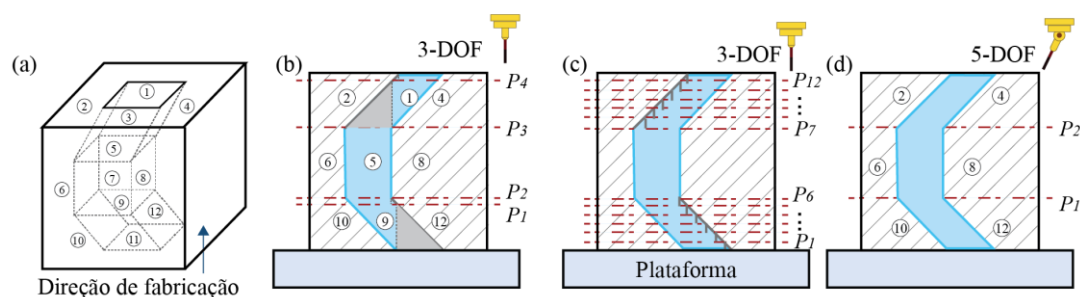
Em função da grande quantidade de parâmetros, em conjunto de possíveis metodologias de otimização do planejamento de fabricação, uma capacidade computacional elevada é exigida para definição das estratégias de fabricação (FELDHAUSEN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023) e, conseqüentemente, alguns *softwares* como Siemens NX<sup>®</sup> e HyperMILL<sup>®</sup> apresentam a possibilidade de realizar a computação dos dados na nuvem (FLYNN *et al.*, 2016). A computação em nuvem também é habilitada para aplicativos gratuitos, como por exemplo o Linux CNC, porém, exige maior capacidade técnica de programação do projetista (BREAZ *et al.*, 2020; PATEL *et al.*, 2021).

Além disso, uma das características que pode exigir maior capacidade computacional é a utilização de ferramentas, de adição e subtração, com elevado grau de liberdade (DOF) (WANG *et al.*, 2022). Essa característica, aliada a quantidade de alternância entre metodologias

aditivas e subtrativas, é responsável pelo aumento da liberdade de projeto (FLYNN *et al.*, 2016; CHONG *et al.*, 2018; HARABIN *et al.*, 2022).

Objetivando exemplificar o efeito da DOF e a quantidade de alternância entre MA e MS, é apresentado na Figura 2.31 a MH de uma peça com três estratégias diferentes, utilizando 3 DOF e 4 alterações entre MA e MS Figura 2.31 (b), com 3 DOF e 12 alterações entre MA e MS Figura 2.31 (c) e com 5 DOF e 2 alterações entre MA e MS Figura 2.31 (d) (WANG *et al.*, 2023).

Figura 2.31 - Comparação da manufatura híbrida (MH) com diferentes graus de liberdade (DOF) e operações aditivas e subtrativas. Os traços vermelhos ( $P_n$ ) indicam as seções com alteração de processos. As regiões marcadas em azul foram processadas por MA e MS, enquanto as cinzas representam as regiões em que não foi possível acessar com a ferramenta de corte para processamento o subtrativo



Fonte: Wang *et al.*, (2023)

Conforme apresentado na Figura 2.31, a utilização de uma quantidade inferior de alterações entre a MA e MS pode limitar a qualidade superficial interna da peça (LIU *et al.*, 2017; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; HARIBIN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023), enquanto que a quantidade elevada pode acarretar em um tempo de fabricação maior (FELDHAUSEN *et al.*, 2022; HARABIN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023), principalmente para materiais que necessitam de um tempo de resfriamento elevado entre a adição de material e usinagem (LI *et al.*, 2018; FELDHAUSEN *et al.*, 2022).

Desse modo, a utilização de uma máquina com maior DOF pode fornecer um menor tempo de fabricação e maior qualidade superficial (LI *et al.*, 2018; ROSSI e LANZETTA, 2020; GUO *et al.*, 2020; FELDHAUSEN *et al.*, 2022), porém o custo de obtenção desses equipamentos pode ser significativamente superior (ROSSI e LANZETTA, 2020).

### 2.4.5 Vantagens e desvantagens da manufatura híbrida

A MH se destaca por conciliar as principais vantagens dos processos envolvidos e reduzir defeitos inerentes de cada processo da sua concepção, em um efeito comumente referenciado como “1+1=3”, simbolizando que o resultado é superior ao somatório individual dos processos (LAUWARES *et al.*, 2014).

A MH de processos aditivos e subtrativos consegue integrar as principais vantagens de cada processo, além da capacidade de criar componentes com características inexecutáveis por técnicas tradicionais, conforme apresentado na Figura 2.31 e pelos autores Wang *et al.* (2023). Dentre as diversas vantagens, as principais são a capacidade de fabricação de componentes com volume interno e detalhes externos de elevada complexidade (CHONG *et al.*, 2018; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023), capacidade de customização dos componentes com custos reduzidos (LANZETTA *et al.*, 2008; GUO *et al.*, 2021); custo-benefício ideal para fabricação de peças em baixa quantidade e elevada complexidade (LI *et al.*, 2018; ROSSI e LANZETTA, 2020; HARIBIN *et al.*, 2022); baixo tempo de processamento em comparação a demais métodos de fabricação, aditivos e subtrativos (ZHU *et al.*, 2013; FLYNN *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2023); capacidade de obtenção de tolerâncias geométricas e dimensionais estreitas (ZHU *et al.*, 2013; (FLYNN *et al.*, 2016; FELDHAUSEN *et al.*, 2022); elevada qualidade superficial (ZHU *et al.*, 2013; FLYNN *et al.*, 2016; CHONG *et al.*, 2018; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023); capacidade de processar diversos tipos de materiais, de polímeros à compósitos com fibra contínua (FLYNN *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2021); e capacidade de automatização do processo (ZHU *et al.*, 2013; FLYNN *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2023).

Enquanto isso, a hibridização ainda apresenta diversas desvantagens, cujo as principais são custo de obtenção do *hardware* e *software* elevado (FLYNN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2018; FELDHAUSEN *et al.*, 2022), elevada complexidade operacional na definição das estratégias de fabricação (FLYNN *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2018; GUO *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2023), dificuldade de previsão das características superficiais do componente a ser fabricado em função da grande quantidade de parâmetros (LI *et al.*, 2018; CHONG *et al.*, 2018; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023), consumo elevado de energia, evidente nos casos em que é necessário um tempo elevado de manufatura (CHONG *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2021 FELDHAUSEN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023) e necessidade de elevada capacidade computacional para definição das estratégia de manufatura, sendo significativo para elevados DOF (LI *et al.*, 2018; FELDHAUSEN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023).

Consequentemente, em função das vantagens e limitações apresentadas, a avaliação empírica dos parâmetros de fabricação é essencial para o desenvolvimento de maquinários e projeto de componentes na manufatura híbrida. Essa análise só possível mediante conhecimento das capacidades e deficiências das técnicas de MA e MS individuais, além das suas características de aplicação em conjunto.

## CAPÍTULO III

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as etapas do procedimento experimental para MA, MS e ensaios não destrutivos nos seguintes itens: 3.1 Fabricação dos CP por MA, 3.2 Fabricação dos CP por MS, 3.3 Ensaios não destrutivos e 3.4 Resumo dos parâmetros de entrada e saída da pesquisa.

#### 3.1 FABRICAÇÃO POR MA

Neste trabalho foi utilizado a máquina de extrusão polimérica de três eixos cartesianos da marca Cliever<sup>®</sup>, modelo CL2 Pro+<sup>®</sup> modificada, localizada no laboratório de ensino em usinagem (LEPU) e filamento 1,75 mm de PLA com fibras de carbono fragmentadas fornecido pela empresa GTMAX3D<sup>®</sup>, sendo que foi necessário realizar modificações no *Hardware* e *Software* da máquina para permitir o controle e fabricação dos corpos de provas (CP) conforme planejado.

##### 3.1.1 Modificações da máquina

Objetivando a fabricação de corpos de prova de PLA com fibras de carbono fragmentado, foi necessário modificar o bico extrusor inicialmente utilizado na máquina CL2 Pro+<sup>®</sup>, em que o principal motivo da alteração foi a baixa resistência ao desgaste dos bicos de latão inicialmente utilizado. De tal forma, foi escolhido para esse experimento um bico de metal duro, modelo Vulcano com diâmetro de 0,4 mm e comprimento 21 mm, fornecido pela GTMAX3D<sup>®</sup>. Todavia, devido a diferença no comprimento total da rosca do modelo Vulcano e o inicialmente utilizado, de latão, foi necessário utilizar um bloco de alumínio diferente. Devido as alterações no *hardware*, foi necessário alterar a operação de nivelamento e diversas seções no G-Code aplicado, sendo que essas modificações são apresentadas nas seções 3.1.2 e 3.1.5, respectivamente.

Os componentes eletrônicos da máquina também foram modificados, com alterações realizadas na intenção de aumentar a segurança, conforto de utilização e capacidade de trabalhar materiais diferentes. Em função da segurança, foi adicionado um botão de parada de

emergência, cujo dispositivo só permite o fluxo de energia após o destravamento por chave, além de facilitar o acesso para desligar a energia da máquina. Para o conforto, foi adicionado um circuito distinto para as luzes da máquina, ambas modificações podem ser visualizadas na Figura.3.1.

Figura.3.1 - Máquina de extrusão polimérica de três eixos cartesianos CL2 Pro+® modificada com botão de acionamento das luzes e de parada de emergência em evidência.



Objetivando o aumento da diversidade de materiais aplicados, foi modificada a placa de aquecimento da mesa, antes aplicando uma placa de 12 volts e, após modificação, uma 24 volts, permitindo alcançar temperaturas próximas a 120 °C, além da redução do tempo necessário para aquecimento da mesa.

### 3.1.2 Nivelamento

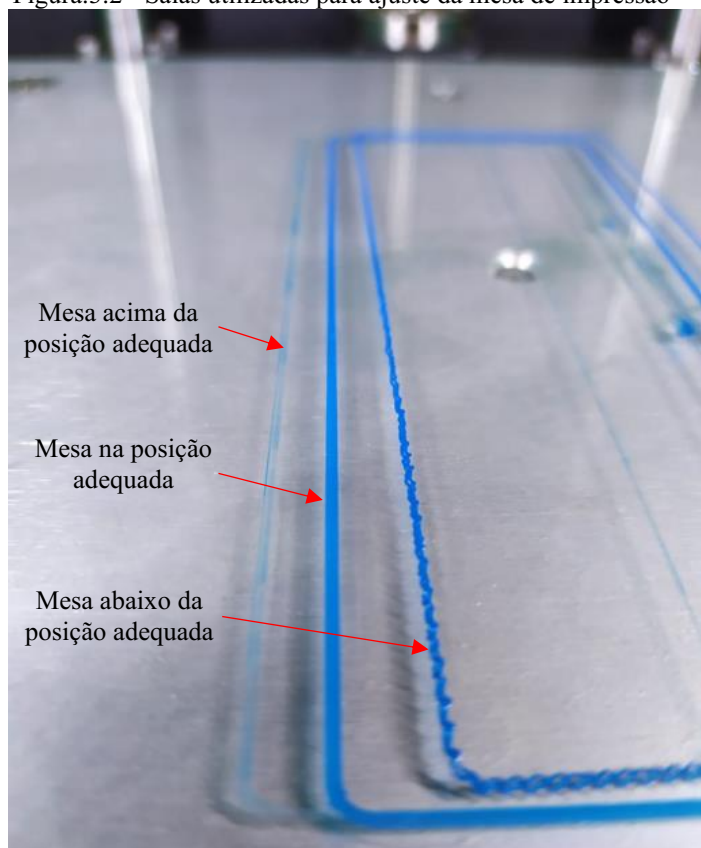
As modificações físicas implementadas na máquina CL2 Pro+® impossibilitaram a aplicação do comando de nivelamento disponibilizado no *firmware* da Cliever®. Essa limitação vem da diferença de comprimento do bico de metal duro, e conseqüentemente, o posicionamento do bocal em uma região inferior ao previsto no projeto inicial da máquina.

De tal forma, a operação de nivelamento foi realizada por meio da “*Bed Leveling Wizard*” no *software* Simplify3D®, cuja opção está disponível por meio da conexão USB entre a máquina e o computador com o Simplify3d® instalado, sendo que esse *software* foi configurado especificamente para operar a CL2 Pro+® modificada, respeitando limitações

físicas dos eixos, motores e temperaturas alcançadas. Um dos motivos da escolha desse *software* foi a possibilidade de configurar a altura de elevação necessária para a mesa, além da possibilidade de escolher quais pontos da mesa que serão utilizados para nivelar. Essa operação de nivelamento foi realizada nos pontos coaxiais dos três parafusos necessários para fixar a mesa.

O nivelamento foi realizado após cada sequência de fabricação dos CP, sendo essa operação validada por meio das características visuais da saia depositada, conforme apresentado na Figura.3.2, em que três padrões típicos de saias são exibidos. Demarcado em vermelho, o nível da mesa está acima da posição ideal, tendo por consequência a obstrução do bocal e gerando a deposição parcial de material. Em contrapartida, a deposição com a mesa abaixo do ideal, demarcado também em vermelho, extruda o material a uma distância elevada da mesa, gerando distorção e baixa adesão do material. Enquanto isso, identificado pela cor preta, é apresentado a posição ideal, em que o bocal deposita o material com uma leve pressão na mesa, porém, sem qualquer tipo de obstrução.

Figura.3.2 - Saias utilizadas para ajuste da mesa de impressão



Fonte: Rosa (2019)



### 3.1.3 Pré-aquecimento do filamento

Nesse trabalho foi utilizado o Filamento de 1,75 mm de diâmetro com Fibra de Carbono fragmentado fornecido pela empresa GTMAX3D<sup>®</sup>. A fibra de carbono fragmentada utilizada apresenta comprimento médio entre 40 µm e 100 µm, além do diâmetro médio de 7 µm, as demais especificações do filamento são apresentadas no Quadro 3.1

Quadro 3.1 - Informações do filamento de fibra de carbono fragmentado fornecido pelo fabricante

Informações do filamento		Característica	Valor
Informações de impressão		Temperatura de extrusão (bico)	210 °C – 240 °C
		Temperatura da mesa	0 °C – 60 °C
Propriedades	Mecânicas	Resistência a tração	11 Kgf – 14 Kgf
		Alongamento na ruptura	3 %
	Físicas	Densidade	1,21 g/cm <sup>3</sup>
	Térmicas	Temperatura de transição vítrea	62 °C

Fonte: GTMAX3D<sup>®</sup>

Objetivando a padronização das propriedades do filamento utilizado nos experimentos, foi aplicado o pré-aquecimento do filamento antes da fabricação das peças, em que foi aplicado aquecimento igual a 55 °C. O Filamento de PLA com fibras de carbono fragmentados só foi utilizado após permanência superior a 12 horas dentro da estufa 3D Printing-Mate<sup>®</sup>, modelo Fila Dryer S1<sup>®</sup>, sendo que esse equipamento ficou ligado durante todo período do ciclo de fabricação dos CPs.

### 3.1.4 Projeto dos corpos de prova

O projeto dos CPs foi realizado utilizando o *software* Autodesk Fusion 360<sup>®</sup>. Esse *software* foi escolhido em função da simplicidade de uso, facilidade de acesso (*Software* liberado para contas associadas a universidade) e capacidade de computação na nuvem, fator decisivo para o projeto em computadores com baixa capacidade de processamento.

Os CPs foram projetados para apresentar geometria externa semelhante aos componentes utilizados por Oliveira (2020). Essa escolha foi realizada para facilitar a comparação de resultados entre as pesquisas e, conseqüentemente, foi escolhido usar o diâmetro externo igual a 15 mm. O desenho técnico dos CPs tipo A e tipo B são apresentados nas Figura 3.3 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, respectivamente.

Figura 3.3 - Desenho Técnico do corpo de prova tipo A cotado em [mm]

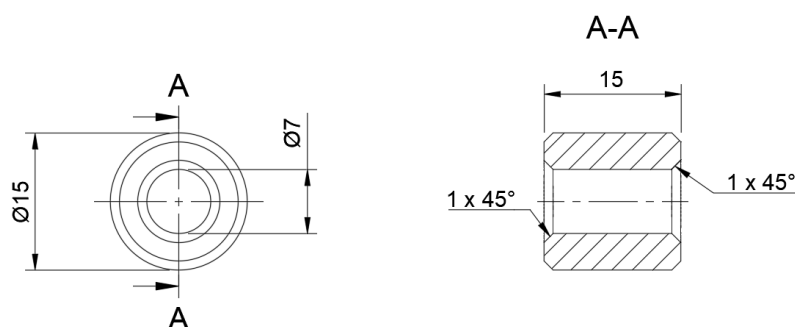
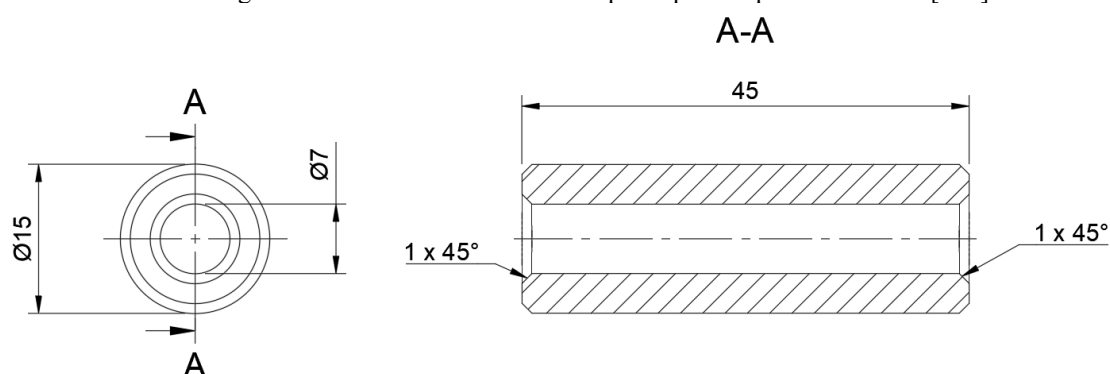


Figura.3.4 - Desenho Técnico do corpo de prova tipo B cotado em [mm]



O diâmetro interno de projeto dos CP deveria ser igual ao externo do suporte de fixação, de 6 mm, porém, devido a deformações internas inerentes do processo aditivo, só foi possível encaixar o CP que apresentava diâmetro interno superior a 6,5 mm. Além disso, objetivando a movimentação radial do CP no suporte e, conseqüentemente, permitindo a redução de possíveis erros do batimento total, foi utilizado um diâmetro interno de 7 mm, permitindo maior capacidade de ajuste e alinhamento dos corpos e suporte.

O comprimento dos corpos de provas tipo A e B foram escolhidos em função da dimensão necessária para avaliação da rugosidade dos corpos. A referência utilizada foi a ISO 4288, que indica o comprimento de 12,5 mm para os corpos de provas com rugosidade,  $R_a$ , entre 2  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ , e 40 mm para corpos com rugosidade,  $R_a$ , entre 10  $\mu\text{m}$  e 80  $\mu\text{m}$ . Por meio de pré-testes, foi possível estimar a rugosidade média dos corpos aditivos e subtrativos, resultando no comprimento de 45 mm para avaliação do método aditivo e 15 mm para avaliação do método subtrativo, de CPs do tipo A e B, respectivamente.

### 3.1.5 G-Code Para Fabricação das Peças

A geração do G-Code necessário para fabricação das peças na máquina CL2 Pro+<sup>®</sup> modificada foi realizada em três etapas, *software* de fatiamento (Simplify3d<sup>®</sup>), modificação manual do arquivo e adaptação do arquivo para compatibilidade com *firmware* da Cliever<sup>®</sup>, sendo que todas essas etapas serão descritas a seguir.

- *Software de fatiamento (Simplify3d<sup>®</sup>)*

A escolha do Simplify3d<sup>®</sup> ao invés do *software* Cliever Studio<sup>®</sup>, aplicativo esse tradicionalmente utilizado nas máquinas Cliever<sup>®</sup>, foi realizada devido a três fatores, o primeiro foi a descontinuidade da distribuição e suporte do Cliever Studio<sup>®</sup>, outro motivo foi incapacidade de readaptação do Cliever Studio<sup>®</sup> às modificações do hardware previamente realizadas na máquina, e finalmente, o Simplify3d<sup>®</sup>, que apresenta uma quantidade maior de parâmetros de controle disponíveis para modificação. Os principais parâmetros utilizados na impressão dos CP são apresentados no Quadro 3.2

Quadro 3.2 – Principais parâmetros aditivos utilizados na impressão dos corpos de prova.

Parâmetros	Valor Inicial	Modificação	Unidades
Diâmetro do bocal	0,40	-	mm
Retração do filamento no G0	0,40	-	mm
Espessura de camada	0,15	0,10/0,15/0,30	mm
Espessura de contorno	0,80	-	mm
Porcentagem de preenchimento	30	-	%
Padrão de preenchimento	Colmeia completa	-	Tipo
Temperatura da plataforma (XX-YY) XX=Primeira camada YY=Camada subsequentes	50-60	0-0 50-60 90-100	°C
Temperatura de extrusão	220	210 / 220 / 240	°C
Velocidade de movimento do bocal (eixo X e Y)	25	-	mm/seg
Velocidade de movimento da mesa (eixo Z)	2	-	mm/seg
Velocidade de movimento G0	150	-	mm/seg

Além dos parâmetros apresentados no Quadro 3.2, foram realizadas modificações para adequação do código gerado no Simplify3d<sup>®</sup> e o esperado nos experimentos. Essas modificações foram realizadas na seção de configuração do “G-Code”, sendo que a primeira

foi a alteração do parâmetro de “*Off-set global*” do G-code, em que foi incrementado em 10 mm à esquerda no eixo X, resultando na correspondência entre o centro da área de trabalho no *software* e espaço físico da máquina.

Ademais, foi necessário a implementação de um código no início de cada uma das peças, cuja adição foi realizada com intuito de garantir o correto referenciamento dos eixos, preparação dos ventiladores, além de confirmar a altura correta de deslocamento do eixo Z e evitar a colisão do novo bocal com a mesa. Tal adição é apresentada abaixo.

G28 ; Referenciamento dos eixos dos eixos X, Y e Z  
 G90 ; Aplicação de coordenadas absolutas  
 M106 S255 ; Acionamento do ventilador, sendo “S” utilizando para definir a velocidade (Entre 0 e 255)  
 G21 ; Aplicação das unidades em milímetros  
 M82 ; Aplicação de coordenadas absolutas no motor de extrusão  
 G1 Z20.000 F5000.000 ; Valor de Z editado para corresponder com configurado no offset do G-code, sendo aplicado a velocidade de 5000 mm/min  
 G28 X Y; Referenciamento dos eixos X e Y  
 G1 E40.000 F200.000 ; Deslocamento de 40 mm do filamento à velocidade de 200 mm/min  
 M204 S500 ; Configuração da aceleração máxima do movimento de G1 e G0 em 500 mm/seg<sup>2</sup>

Essa implementação foi realizada no início de todas as peças fabricadas na máquina CL2 Pro+<sup>®</sup> modificada, sendo que não foi aplicado nenhuma alteração dos *scripts* no código entre camadas depositadas, retração do bocal ou para troca de ferramentas. Ao final do código foi realizado uma adição, porém essa implementação não foi realizada pelo *software*, apenas manualmente, conforme apresentado na próxima seção.

- *Modificação manual do arquivo*

Visando reduzir o tempo dedicado no trabalho manual, foi utilizando uma inserção manual no G-Code gerado pelo Simplify3d<sup>®</sup>. Essa alteração possibilitou a fabricação sequencial dos corpos de prova e, conseqüentemente, possibilitando que o procedimento de retirada dos CPs e armazenagem fosse realizado com menor frequência.

Essa fabricação sequencial das peças só pode ser aplicada nos casos em que não ocorram colisões entre os componentes previamente depositados e o bocal e, assim sendo, foi estritamente necessário o conhecimento da dimensão e trajetos realizados pelo bocal. Essa

análise foi realizada por meio da movimentação do bocal e mesa na opção de “Machine control Panel” do Simplify3d®.

Após movimentação e entendimento dos caminhos traçados para deposição de material, foi definido a disposição dos corpos do tipo A e tipo B, sendo esta configuração representada esquematicamente nas Figura 3.5 e

Figura 3.6, respectivamente. Conforme apresentado na

Figura 3.6, foi fabricada uma quantidade inferior de CPs tipo B por ciclo, sendo que essa escolha foi realizada em função do comprimento superior do CP, fator que possibilitou colisões em trajetos tolerados na fabricação dos CPs tipo A.

O tempo de fabricação dos Ciclos apresentados foram de aproximadamente 13 horas para os CPs tipo A e 11 horas para o ciclo do Tipo B. Além disso, apesar da representação esquemática da Figura 3.5 e

Figura 3.6 serem realizadas no Simplify3d® o código de fabricação das peças foram exportados individualmente. A união dos códigos individuais das peças foi realizada manualmente, sendo utilizado o bloco de notas para realizar essa operação de combinação dos códigos.

Figura 3.5 - Representação gráfica da posição (Eixo X; Eixo Y) e ordem de fabricação dos corpos de prova tipo A.

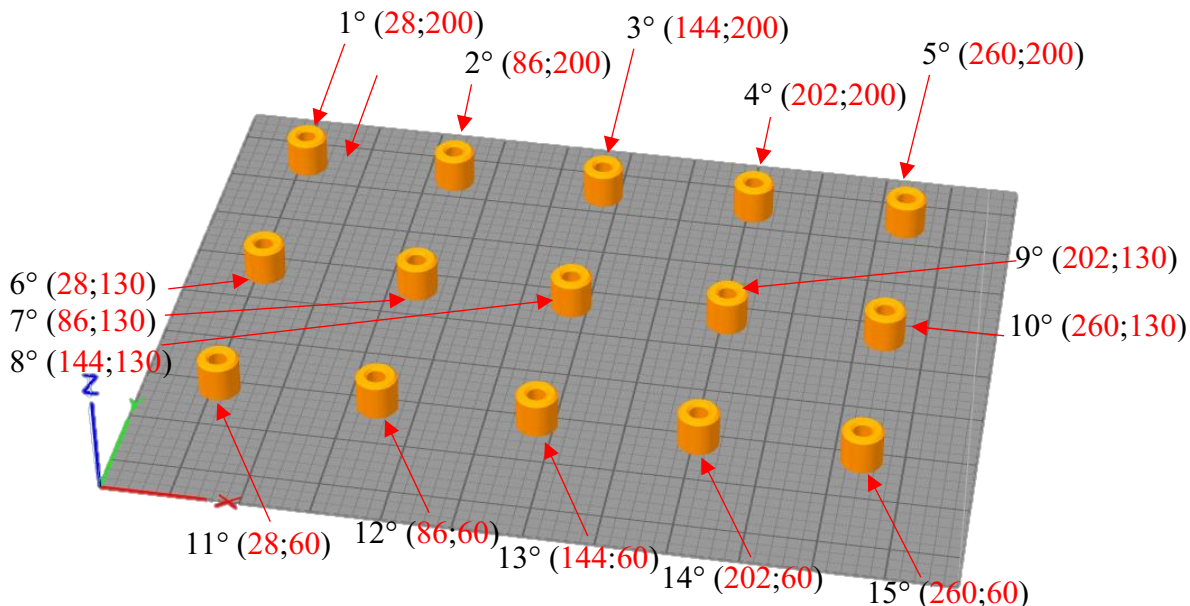
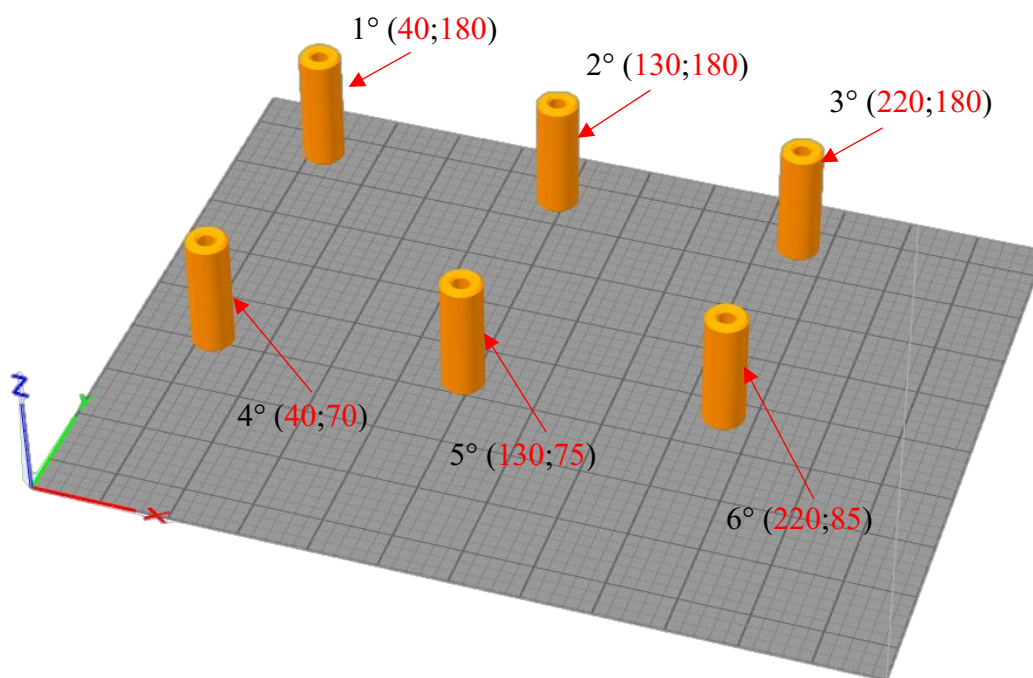


Figura 3.6 - Representação gráfica da posição (Eixo X; Eixo Y) e ordem de fabricação dos corpos de prova tipo B



Além disso, com a intenção de garantir equivalência do ciclo térmico das peças e filamento, foi adicionado quatro linhas de comandos entre a combinação dos códigos individuais das peças, sendo que essa adição está disponibilizada abaixo:

M104 S0 T0; Reduz a temperatura do bocal para 0° C (desligando resistência)

G28 X0 Y0 Z0; Referenciamento dos eixos X, Y e Z

M84; desligar motores

G4 P1200000; esperar por 1 200 000 milissegundos (20 minutos)

O principal objetivo dessas alterações foi diminuir a temperatura do bocal entre as peças depositadas e, conseqüentemente, evitando o superaquecimento do filamento nas últimas peças do ciclo. O comando G4 foi utilizado para garantir que, além do resfriamento do bocal, todo o filamento antes do bico também fosse resfriado, enquanto isso, a temperatura da mesa permaneceu constante durante todo ciclo de fabricação a fim de evitar alterações nos parâmetros definidos e, finalmente, o comando M84 foi aplicado com intenção de evitar o superaquecimento dos motores.

Após a última peça do ciclo, foi adicionado um código semelhante ao incorporado entre as peças intermediárias, sendo que a única diferença foi o tempo de espera, equivalente a

sessenta minutos. Esse tempo elevado foi utilizado para proporcionar equivalência térmica aos corpos de provas fabricados, garantindo que todos CPs permaneçam no mínimo uma hora após o término da fabricação.

- *Adaptação do arquivo para compatibilidade com hardware da Cliever*

As melhorias realizadas na máquina CL2 Pro+<sup>®</sup> foram limitadas ao bocal, dispositivos de segurança e fonte de energia da mesa aquecida, entretanto, o hardware do sistema de comando permaneceu e, em virtude disso, as limitações em relação aos *softwares* aplicáveis no maquinário da Cliever continuaram. Uma das principais limitações é a inviabilidade de utilização de arquivos que não estejam no formato “.CL”, sendo que o Cliever Studio<sup>®</sup> é o único *software* de fatiamento capaz de exportar nesse formato.

As limitações citadas foram resolvidas por meio do tratamento dos arquivos exportados do Simplify3d<sup>®</sup>, em que esse procedimento foi realizado através da cópia do código-G gerado nesse *software* para um arquivo “.CL” em branco previamente criado no Cliever Studio<sup>®</sup>. Antes da adição do código-G gerado pelo Simplify3d<sup>®</sup>, foi adicionado um comentário referente ao tempo necessário para fabricação do componente, descrito como “; tempo restante = “. Foi adicionado logo em seguida o tempo necessário em segundos para fabricação, cuja adição é compreendida pela máquina e apresentada no seu visor.

Além disso, foram adicionadas apenas as informações de linhas de movimentação e comandos no arquivo “.CL”. Os únicos comentários foram aqueles contidos após um comando de movimentação ou preparação da máquina, sendo que todas as outras linhas de comandos contendo apenas comentários foram retiradas.

### **3.1.6 Armazenagem e identificação das peças**

A armazenagem dos CPs foi realizada por meio de uma pasta com divisórias. Além da pasta, foi utilizado invólucros de plástico para cada um dos corpos, sendo que esse plástico realizou duas funções, a primeira foi de proteger o corpo de prova contra qualquer desgaste ou deformação devido ao contato com os demais CP na pasta e a segunda foi de identificar o CP armazenado. Essa segunda função se tornou necessária devido a impossibilidade de marcar a superfície do corpo de prova sem possivelmente alterar suas características. Na Figura 3.7 é apresentado um exemplo de invólucro utilizado para armazenamento dos corpos de prova, os corpos de provas com 15 mm e 45 mm utilizaram o mesmo tipo de proteção.

Figura 3.7 - Invólucro utilizado para armazenamento e identificação dos corpos de prova tipo A e tipo B.



### 3.2 FABRICAÇÃO POR MS

Nesse trabalho, a manufatura subtrativa foi realizada mediante aplicação de um minitorno mecânico de bancada modelo MR-300 fabricada pelo Manrod® localizado no laboratório de ensino e pesquisa em usinagem (LEPU), sendo que esse equipamento foi atualizado por Silva *et al.* (2017) e Oliveira (2020). Essas atualizações foram realizadas com objetivo de permitir aplicação CNC e, conseqüentemente, obtenção de melhor repetibilidade dos ensaios realizados no equipamento.

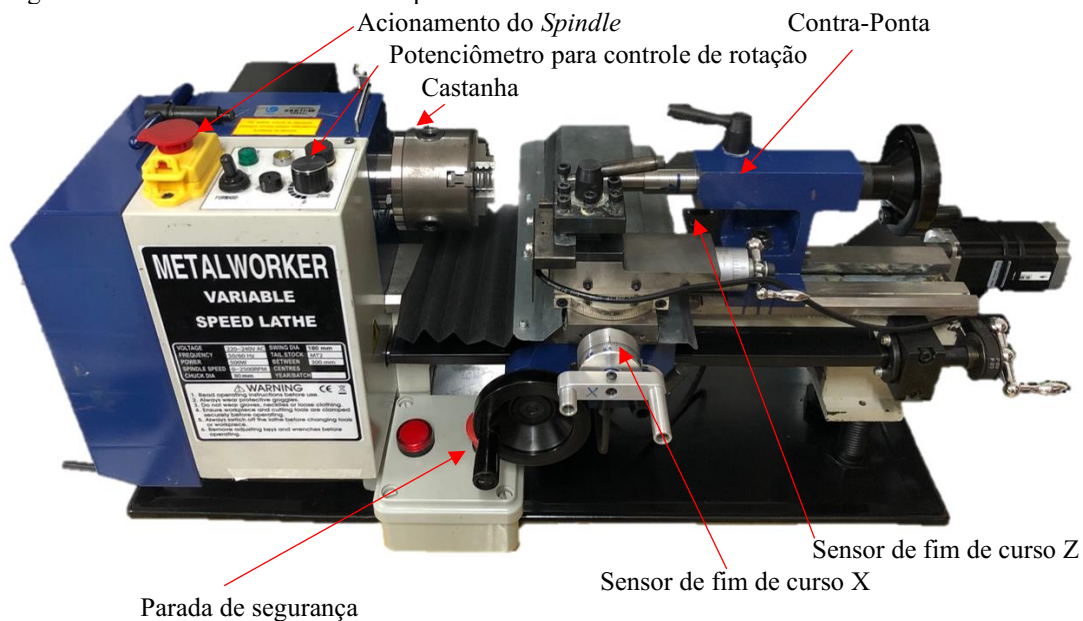
#### 3.2.1 Modificações da máquina

O minitorno mecânico de bancada foi atualizado com dois sensores de fim de curso, cada um deles utilizado para referenciamento dos eixos Z e X, sendo que, objetivando a proteção e correta fixação desses sensores foi projetado e fabricado suportes e proteções para implementação desses dispositivos no minitorno, em que os detalhes de projeto e fabricação dessas atualizações podem ser encontrados no trabalho de Oliveira (2020). Além disso, o sistema de acionamento do equipamento foi modificado, removendo o gabinete do microcomputador e o realocado em uma caixa plástica externa em conjunto da atualização de todas as ligações elétricas para garantir segurança de aplicação.

Na Figura 3.8 é apresentado o minitorno mecânico de bancada, e nessa foto é apresentado os principais dispositivos presentes na máquina, além da localização dos sensores.



Figura 3.8 - Minitorno CNC utilizado para ensaios de torneamento cilíndrico externo



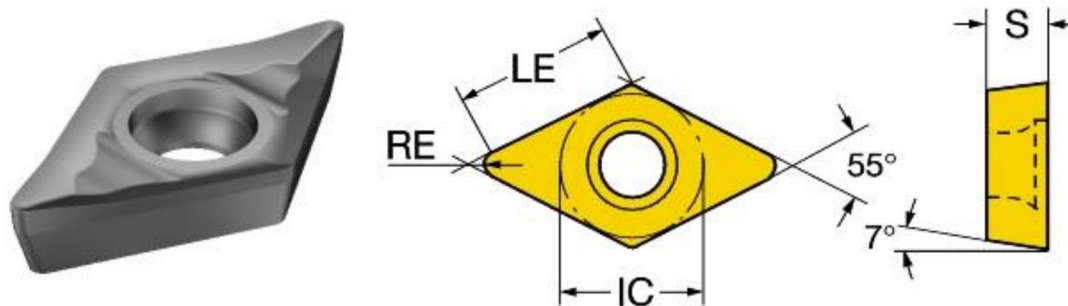
Fonte: Oliveira (2020)

Esse equipamento apresenta rotação limite do eixo arvore de 2 500 rpm, placa de três castanhas de 80 mm de diâmetro, distância máxima 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 velocidade de avanço máxima de 900 mm/min.

### 3.2.2 Ferramenta de corte

A ferramenta de corte selecionada nesse trabalho foi escolhida em função dos resultados do estudo realizado por Oliveira (2020), sendo aplicada a ferramenta que proporcionou os menores valores de rugosidade das peças de PLA torneadas. Dessa forma, a pastilha intercambiável de metal duro da Sandvik®, apresentando código de identificação de DCGX0702 04 AL 1105, foi utilizada nesse trabalho. Essa ferramenta apresenta raio de ponta de 0,4 mm, comprimento efetivo de aresta de corte (LE) de 7,352 mm, ângulo de saída de 20°, ângulo de posição de 90°, ângulo de ponta de 55° e revestimento TiAlN. A geometria detalhada é apresentada na Figura 3.9.

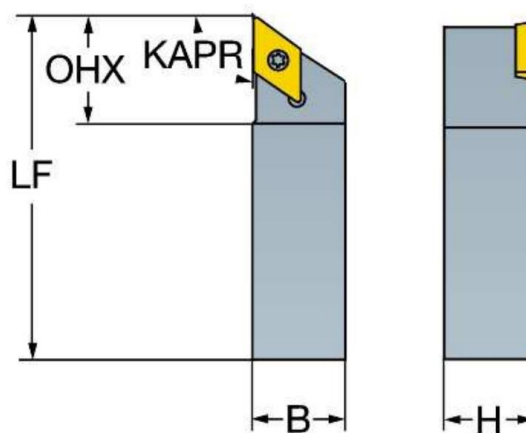
Figura 3.9- Pastilha intercambiável de metal duro DCGX 0702 04 AL 1105 (ângulo de saída de 20°, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, ângulo de folga de 7°, ângulo de ponta de 55°, revestimento TiAlN)



Fonte: SANDVIK COROMANT® (2023)

Além disso, o suporte da ferramenta SDACR 1212K-07-S da marca Sandvik® foi utilizado nessa pesquisa e suas principais características são representadas graficamente na Figura 3.10. Esse suporte apresenta um 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).

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



Fonte: SANDVIK COROMANT® (2023)

### 3.2.3 Suporte para fixação das peças no minitorno

A fixação do CP no minitorno e Máquina de Medir Desvio de Forma (MMDF) foi realizado por intermédio de um mandril intercambiável e uma bucha de fixação. Os desenhos técnicos desses dispositivos são apresentados na Figura 3.11 e Figura 3.12, respectivamente.

Figura 3.11 - Mandril de fixação utilizado nas operações de subtração e medição dos desvios macrogeométricos dos corpos de prova.

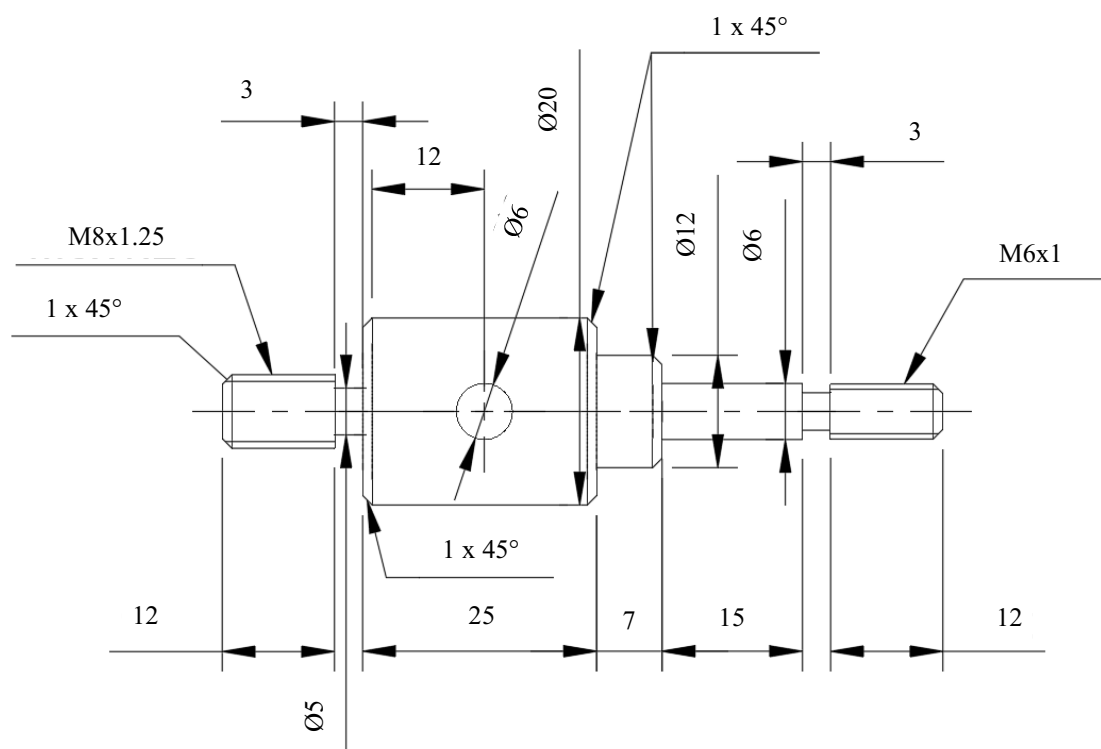
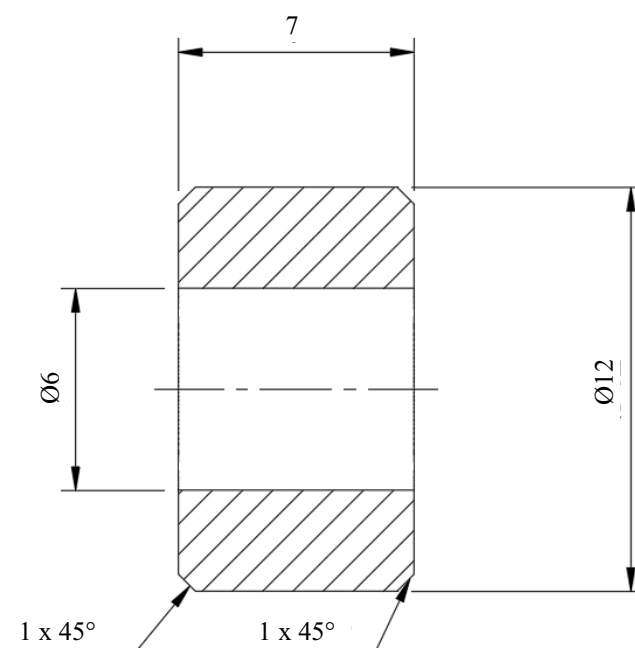
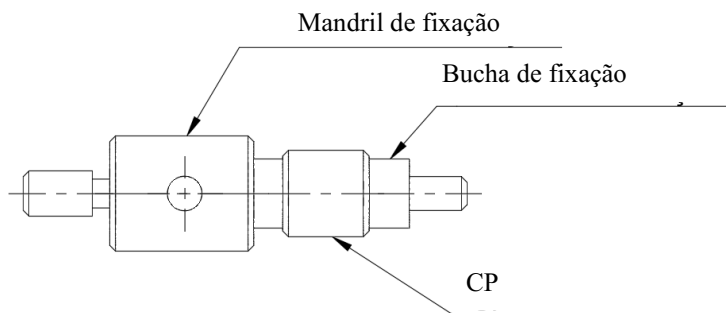


Figura 3.12 - Bucha de fixação utilizado nas operações de subtração e medição dos desvios macrogeométricos dos Corpos de Prova.



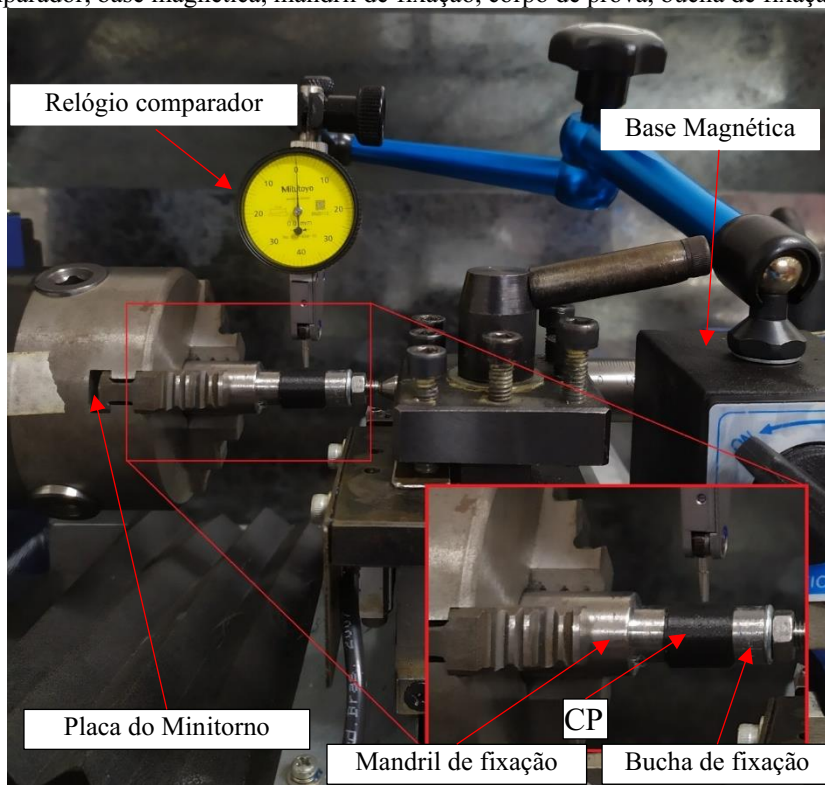
A fixação dos CP no suporte foi realizada por meio da compressão gerada por uma porca M6x1,0 sobre a bucha de fixação. Na Figura 3.13 é apresentado a montagem do mandril, bucha de fixação e CP.

Figura 3.13 Montagem do Mandril de fixação, corpo de prova (CP) e bucha de fixação.



Além disso, devido a diferença entre o diâmetro externo da região de fixação do CP no mandril, e o diâmetro interno efetivo do CP, foi possível realizar o ajuste da peça no eixo do mandril e, conseqüentemente, redução do batimento da peça em relação ao eixo do minitorno. Na Figura 3.14 é apresentada uma das etapas de fixação da peça, mandril e minitorno, em que foi utilizado um relógio comparador da marca Mitutoyo®, com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 1 mm. O CP foi ajustado até que a variação no relógio comparador fosse inferior a 0,2 mm, sendo que esse valor foi decidido em função do desvio de cilíndricidade médio dos pré-testes fabricados por MA e ensaiados na MMDF, em que corpos apresentaram desvio de cilíndricidade superior a 200  $\mu\text{m}$ .

Figura 3.14 - Montagem do sistema de ensaio do torneamento cilíndrico externo, utilizando o relógio comparador, base magnética, mandril de fixação, corpo de prova, bucha de fixação e minitorno CNC.



### 3.2.4 G-Code Para Fabricação das Peças

Os movimentos longitudinais e transversais do minitorno foram controlados pelo aplicativo de comando de código livre LinuxCNC. A versão utilizada foi implementada automaticamente com a instalação do “linuxcnc-2.8.4-buster”, sendo empregado um computador exclusivo no controle do minitorno.

Nesse aplicativo foi utilizado sete programas distintos, sendo dois códigos diferentes para cada um dos três parâmetros subtrativos, além de um para o modelo padrão (SPAD), conforme apresentado no quadro. Todos os códigos apresentavam o mesmo padrão de movimentação longitudinal, de modo que a única divergência era realizada exclusivamente na velocidade de avanço e profundidade de corte.

Quadro 3.3 Designação dos corpos de prova e códigos utilizados na fabricação dos corpos de prova por MS para os parâmetros de Velocidade de Corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ).

Designação do CP e Código CNC	Parâmetros		
	$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/volta]	$a_p$ [mm]
SPAD	35	0,10	0,4
SVC - 20	<b>20</b>	0,10	0,4
SVC - 50	<b>50</b>	0,10	0,4
SVA - 05	35	<b>0,05</b>	0,4
SVA - 15	35	<b>0,15</b>	0,4
SPC - 02	35	0,10	<b>0,2</b>
SPC - 06	35	0,10	<b>0,6</b>

O CNC não é capaz de controlar a velocidade de rotação do minitorno no estágio atual de desenvolvimento do sistema de controle, de tal forma que foi necessário ajustar a velocidade de corte por meio de um tacômetro. Todavia, conforme a definição do avanço em função da rotação, foi necessário realizar o ajuste do G-code nas peças em que foram modificadas apenas a velocidade de corte, sendo que o único parâmetro ajustado nesse caso foi o avanço.

### 3.2.5 Controle da rotação do minitorno

A definição da rotação do eixo arvore do minitorno foi realizada por meio de um potenciômetro localizado na parte superior do equipamento, conforme apresentado na Figura

3.8. A verificação da rotação aplicada foi realizada por meio de um tacógrafo óptico modelo DT-2236 fornecido pela Tepcel<sup>®</sup>.

O tacógrafo utilizado nesse trabalho apresenta duas metodologias de verificação da rotação, por contato, utilizando uma pequena roda de borracha para transmissão do movimento, ou sem contato, em que é realizado por meio da reflexão alternativa em um eixo rotativo. Nesse trabalho, foi utilizada a metodologia sem contato, sendo aplicada uma fita na cor preta por todo perímetro da castanha, exceto em uma área de 20 mm em que foi adicionada uma fita branca, que apresentava maior capacidade reflexiva. Esse procedimento foi realizado para garantir que ocorreria a reflexão em apenas um ponto da castanha e, conseqüentemente, garantindo a precisão do resultado emitido pelo equipamento.

### 3.2.6 Fabricação dos corpos de prova

Todas as operações subtrativas foram realizadas após aproximação da contra ponta, referenciamento da ferramenta e ajuste da peça no suporte por meio de um relógio comparador, conforme apresentado na seção 3.2.3. Após ajuste, foi retirado o suporte magnético com o relógio comparador acoplado e foi iniciado o procedimento de definição da rotação necessária para o CP, conforme apresentado na seção 3.2.5. Em seguida, foi movimentado longitudinalmente a ferramenta de corte para a região central do corpo e, utilizando a velocidade de 17 mm/min, a ferramenta de corte foi movimentada radialmente até o contato com a peça. Após contato, foi utilizado a função apalpar do LinuxCNC e assim ocorreu a definição da referência relativa no eixo X no *software*, sendo informado o diâmetro de 14,5 em todos CPs. A definição desse diâmetro foi realizada em função da aproximação da média dos diâmetros de todos CPs fabricados.

Posterior a definição do diâmetro, a ferramenta foi afastada radialmente do corpo de prova, e em seguida, transcolada longitudinalmente em 15 mm positivos no eixo Z, sentido oposto a castanha. Uma vez que a ferramenta foi posicionada nessa região, foi acionado o G-Code específico para o CP em ensaio. O procedimento de subtração de material ocorreu entre 8 s e 24 s.

Depois da subtração de material do corpo de prova, a contra ponta foi afastada e o corpo de prova foi desacoplado do suporte. Em alguns casos, o cavaco gerado continuou em contato com a peça após usinagem, um exemplo desse evento é apresentado na Figura 3.15. Nesses casos, o cavaco foi retirado perpendicularmente ao diâmetro do CP.

Figura 3.15 – Formação de cavaco que ficou em contato com a peça após usinagem, sendo utilizado o corpo de prova com designação SVC 20 – II para exemplificar o evento.



### 3.2.7 Armazenagem e identificação das peças e cavacos

Após a operação de usinagem, o corpo de prova foi armazenado na mesma embalagem utilizada após a manufatura aditiva, sendo adicionado uma fita com a identificação em função dos parâmetros de corte. Um exemplo dessa identificação é apresentado na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Adição da identificação nos corpos de prova após ensaios de usinagem.



Posteriormente ao retorno da peça à embalagem, foi armazenado os cavacos, em que esses foram removidos diretamente da peça ou coletados após caírem sobre a máquina. A embalagem utilizada para armazenagem foi a de um modelo igual ao aplicado nas peças, sendo que o pacote foi identificado com os mesmos símbolos do CP oriundo do material removido. Na Figura 3.17 é apresentado um exemplo de armazenagem do cavaco.

Figura 3.17 - Exemplo de identificação dos cavacos gerados no processamento subtrativo



### 3.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

A avaliação qualitativa e quantitativa desse trabalho foi realizada por meio de ensaios não destrutivos, sendo o principal objetivo a caracterização superficial e geométrica das peças fabricadas por MA e MS. Nesse contexto, os CPs foram avaliados por meio da circularidade, cilindridade, massa, dimensão, perfilometria e rugosidade. Além disso, a ferramenta de corte utilizada no processo subtrativo foi avaliada, porém apenas por aspectos visuais.

#### 3.3.1 Cilindricidade

A circularidade e cilindridade foram avaliadas por meio da MMDF, Talyrond 131 da Taylor Hobson® em conjunto do *software* Taylor Hobson Ultra® localizado no laboratório de metrologia dimensional (LEMETRO). Os limites de aplicação desse equipamento são de 370 mm de diâmetro e 225 mm de altura, enquanto sua resolução radial é de 0,03  $\mu\text{m}$ .

As medições foram realizadas em todos CP do tipo A, avaliando antes e depois da usinagem. Todos os experimentos foram realizados em uma sala com temperatura constante em  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo que cada corpo de prova permaneceu no mínimo de 12 horas no local antes do início das medições.

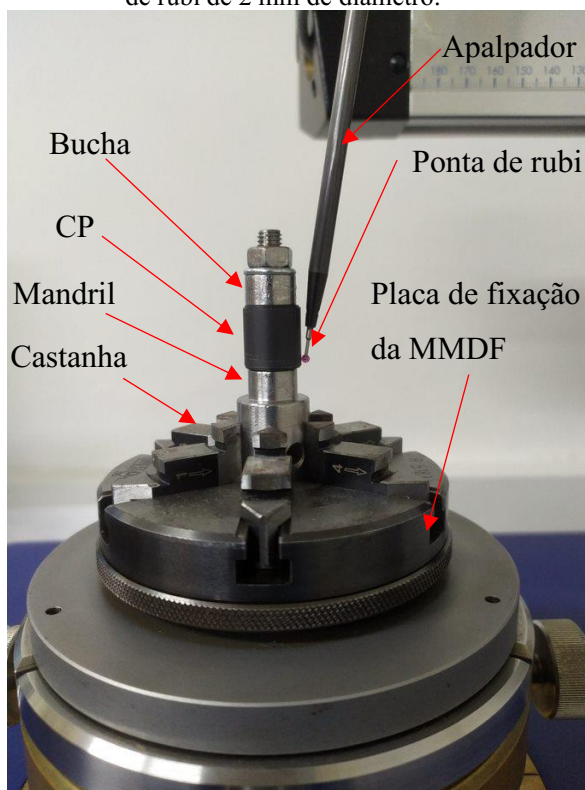
Nesse experimento, foi utilizado um apalpador com ponta de rubi e diâmetro de 2 mm. Essa escolha foi realizada em função dos resultados publicados por Oliveira (2020) em conjunto de pré-testes realizados nessa pesquisa, na qual os diâmetros inferiores proporcionavam problemas no movimento relativo entre peça e apalpador, o que inviabilizou a medição.

A fixação do CP na MMDF só foi possível via aplicação de um mandril, sendo utilizado o mesmo equipamento apresentado na Figura 3.12 do processo de usinagem. A



montagem final é apresentada na Figura 3.18, em que é exibido o conjunto de placa de fixação da máquina, mandril de fixação, corpo de prova e apalpador.

Figura 3.18 - Montagem do corpo de prova na Talyrond 131 da Taylor Hobson® (MMDF) utilizando uma ponta de rubi de 2 mm de diâmetro.



O *software* Taylor Hobson Ultra® foi utilizado tanto para análise dos resultados, conforme normas ISO 12180 e ISO 1101, quanto para controle da MMDF® durante experimento. Foi aplicado para todas as peças a medição de 11 planos, espaçados entre eles em 1 mm e rotacionados na velocidade angular de 6 RPM no sentido horário, em que o primeiro plano foi o mais próximo da castanha e último na região mais distante. Além disso, em função da necessidade de coleta de informações de um diâmetro externo do CP, foi utilizado a configuração tipo A do equipamento, conforme recomendações do fabricante da máquina.

Esse experimento foi realizado no mínimo cinco vezes por corpo de prova e, a adição de repetições ocorreu mediante visualização de peculiaridades ou anomalias no processo de medição, podendo ocorrer em função de vibrações ou problemas na configuração da máquina. Nesses casos, foi repetido o experimento até a geração de cinco avaliações que não apresentavam anomalias superficiais como picos e vales acentuados na análise.

Após a finalização de cada experimento, foi gerado um PDF contendo todas as informações do CP. Esse arquivo apresentava oito valores a serem coletados, e em conjunto da

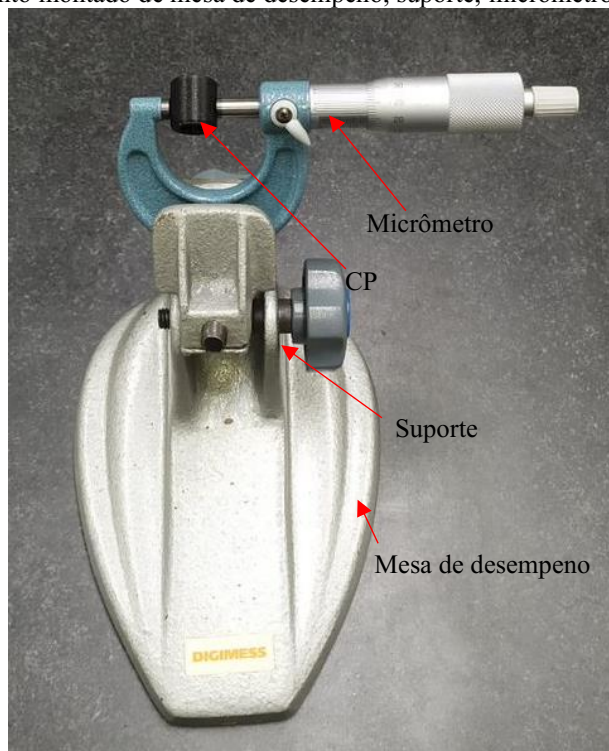
elevada quantidade de análises, se tornou impraticável a coleta manual das informações. De tal forma, foi escrito um código no Python<sup>®</sup> para ler, armazenar e exportar em Excel todas as informações do conjunto de PDF gerados no *software* Taylor Hobson Ultra<sup>®</sup>.

### 3.3.2 Medição de massa e dimensão

A massa e dimensão externa do CPs foram coletadas após finalização de cada técnica de fabricação, aditiva e subtrativa. Foi utilizado o micrômetro Mitutoyo<sup>®</sup> com resolução de 0,001 com faixa nominal de 25 mm e a balança de quatro casas decimais da fabricante SHIMADZU<sup>®</sup>, modelo AUY220, respectivamente. Foi coletado cinco medidas de massa, cinco do diâmetro externo e cinco da altura das peças em cada conjunto de medição.

A coleta das dimensões externas foi realizada após permanência das peças superior a doze horas em uma sala com ambiente controlado á  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Além disso, para facilitar a leitura e minimizar o erro de Abbé, foi utilizado um suporte para fixação do micrômetro, sendo o conjunto do suporte, micrômetro e peça, apresentado na Figura 3.19. Ademais, uma vez que esse conjunto foi montado, só foi desmontado após finalização da análise de todos CPs.

Figura 3.19 - Conjunto montado de mesa de desempenho, suporte, micrômetro e corpo de prova.



As informações de massa foram realizadas após permanência do CP superior a uma hora em uma sala ambientada a  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo que foi utilizado a abertura lateral para inserção dos corpos de prova na balança. A repetição das medidas foi realizada por meio da retirada do CP, com a espera de alguns segundos com todas as portas fechadas e a posterior inserção do corpo no interior da balança.

Finalmente, as incertezas de medições dimensionais foram calculadas em função do guia de expressão de incerteza de medição (GUM). Nessa metodologia é elaborado um modelo matemático que descreve o resultado e a incerteza associada a ele e a aplicação dessa análise é realizado conforme apresentado na equação 3.1.

$$De = \bar{X} + \Delta R + \Delta CP + \Delta Pa \quad (3.1)$$

Em que:

$De$  = diâmetro externo do CP

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

$\Delta R$  = resolução finita do sistema de medição

$\Delta CP$  = incerteza de medição do instrumento para medições externas

$\Delta Pa$  = incerteza associada ao paralelismo das faces de medição

Devido a necessidade de aplicação da lei de propagação de incertezas no modelo da equação 3.1, foi gerado a equação 3.2.

$$u_c^2(De) = \left(\frac{\partial De}{\partial \bar{X}}\right)^2 * u^2(\bar{X}) + \left(\frac{\partial De}{\partial \Delta R}\right)^2 * u^2(\Delta R) + \left(\frac{\partial De}{\partial \Delta CP}\right)^2 * u^2(\Delta CP) + \left(\frac{\partial De}{\partial \Delta Pa}\right)^2 * u^2(\Delta Pa) \quad (3.2)$$

Em que:

$u$  = incerteza padrão

$u_c$  = incerteza expandida

As variáveis que podem influenciar na incerteza de dimensão são apresentadas no Quadro 3.4, enquanto o fator de abrangência ( $k$ ) utilizado nas equações apresentadas na quadro são iguais a 0,005, conforme certificado de calibração do equipamento.

Quadro 3.4 Equações aplicadas para cálculo das variáveis utilizadas no cálculo de incerteza

Variável	Cálculo	Tipo de Avaliação	Distribuição de probabilidade	Graus de Liberdade
$\bar{X}$	$\frac{s(\bar{X})}{\sqrt{n}}$	A	T de Student	14
$\Delta R$	$\frac{R}{2\sqrt{3}}$	B	Retangular	$\infty$
$\Delta CP$	$\frac{u(CP)}{k}$	A	T de Student	$\infty$
$\Delta Pa$	$\frac{u(Pa)}{k}$	A	T de Student	$\infty$

### 3.3.3 Perfilometria e Rugosidade

Devido à baixa resistência mecânica dos CPs em relação aos metais, foi inviável a aplicação da avaliação da rugosidade e perfilometria por contato. De tal forma, foi utilizado o interferômetro LASER UBM<sup>®</sup> sem contato, atualizado, localizado no laboratório de tribologia e materiais (LTM). As principais características de uso desse equipamento são o sensor confocal modelo KF3 à Laser com resolução de 20 nm, faixa de medição de 1 000  $\mu\text{m}$ , sistema de movimentação com repetibilidade unidirecional de 0,5  $\mu\text{m}$ , além de máxima velocidade de translação de 30 mm/min e limite de deslocamento dos eixos x e y de 100 mm. Além disso, a avaliação das peças foi realizada após uma permanência superior a 6 horas na sala ambientada com temperatura de 25 °C  $\pm$ 1 °C.

A fim de reduzir o tempo de manuseio dedicado nos ensaios, foi utilizado um suporte de fixação para avaliar diversas peças simultaneamente. Esse suporte possibilita o ajuste individual de cada uma das peças e, conseqüentemente, permiti programar a avaliação sequencial de todas as peças, sendo essa programação realizada no programa Inspector<sup>®</sup>. De tal forma, foram avaliadas doze CPs tipo A simultaneamente, enquanto no tipo B, por apresentar comprimento superior, foi possível ensaiar quatro CP por ciclo de medição. Esse conjunto de interferômetro, suporte e CPs são apresentados na Figura 3.20.

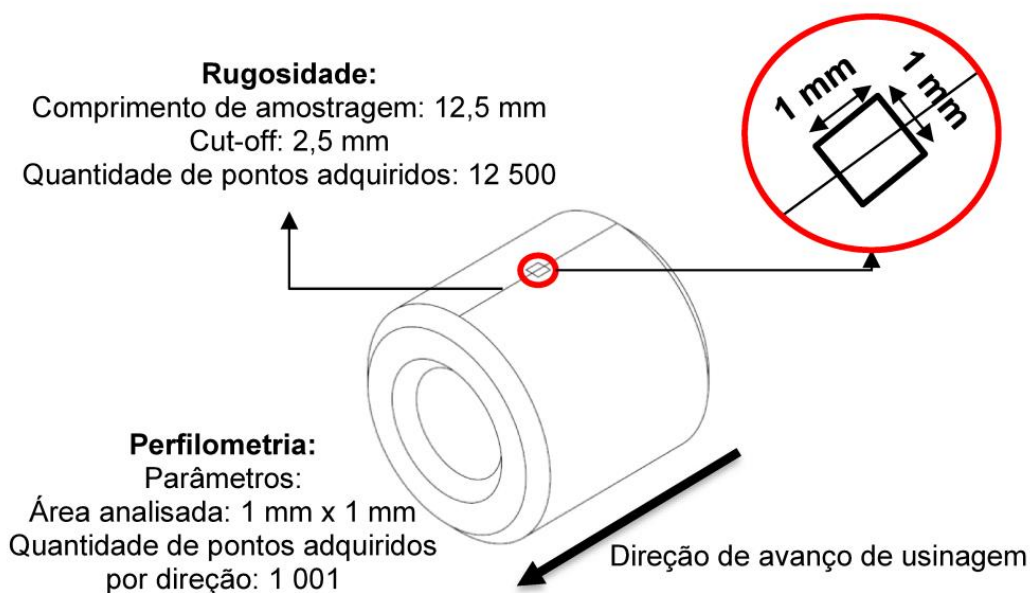
Figura 3.20 - Montagem de corpos de prova para avaliação de rugosidade e perfilometria no interferômetro LASER UBM®



A avaliação da rugosidade foi realizada após MA e depois da MS, sendo essas informações coletadas de forma iterativa por meio de pré-testes. Esses pré-testes foram realizados para definição aproximada da rugosidade, e de acordo com a norma ISO 4288, foram definidos os reais valores de *cut-off* necessários. De tal modo, foram definidos um *cut-off* de 2,5 mm e 8 mm para peças após MS e MA, respectivamente. A aplicação desse *cut-off* está de acordo com o esperado no planejamento experimental, uma vez que foram fabricadas peças de 15 mm (Tipo A) e 45 mm (Tipo B) para avaliação da rugosidade dos corpos de prova após MS e MA respectivamente.

A extração dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_t$  foram realizadas segundo a norma ISO 4287, enquanto a avaliação topográfica das superfícies pelos parâmetros  $S_q$  e  $S_a$  seguiram a norma ISO 25178. A análise da perfilometria foi realizada em uma área de 1 mm por 1 mm próxima ao centro do CP, conforme apresentado na Figura 3.21. Nos casos da existência de alguma anomalia, foi adicionado uma nova análise em uma região diferente do mesmo corpo de prova.

Figura 3.21 - Regiões de medição de rugosidade e perfilometria nos corpos de prova



Fonte: Oliveira (2020)

Além das configurações de densidade de 1.001 pontos por mm no eixo X e 1001 pontos no eixo Y para perfilometria, e 12.500 pontos da avaliação de rugosidade, conforme apresentado na Figura 3.21, foi definido a velocidade de movimentação em 0,5 mm por segundo à frequência de 16 Hz para perfilometria e rugosidade. Todas essas configurações foram realizadas no *software* de controle da máquina, Inspector<sup>®</sup>, enquanto o tratamento de dados foi realizado em uma etapa posterior, no *software* Mountains Map<sup>®</sup>.

A aplicação do Mountains Map<sup>®</sup> foi realizada para tratamento dos dados e posterior definição dos parâmetros de rugosidade e aspectos superficiais, conforme normas ISO 4287 e ISO 25178, respectivamente. Os tratamentos aplicados foram de nivelamento dos pontos coletados e posterior limitação, em que foi retirado da análise os pontos que apresentavam valores inferiores a 0,05 % ou superiores a 99,95 % do alcance máximo dos pontos medidos.

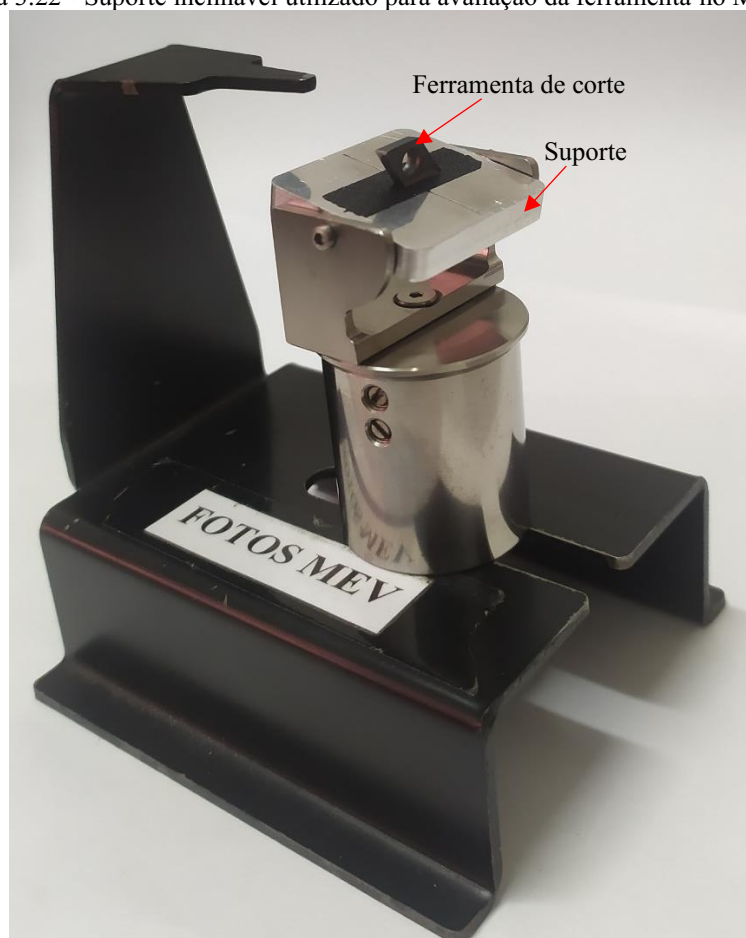
### 3.3.4 Microscópio Eletrônico de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Hitachi, modelo TM-3000<sup>®</sup> com ampliação máxima de 30 000 vezes, localizado no laboratório de ensino e pesquisa em usinagem (LEPU). Esse foi equipamento utilizado na verificação dos possíveis mecanismos de desgaste da ferramenta de corte durante a usinagem dos CPs, sendo que todas as análises foram realizadas em ambiente

com temperatura controlada de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Além disso, a ferramenta de corte só entrou no microscópio após limpeza em um ultrassom, procedimento este realizado por meio da inserção da ferramenta em acetona, enquanto a transmissão das ondas ocorreu em um meio com água.

Foram realizadas duas análises, uma no início e uma após a usinagem de todos os CPs, sendo que em todas as medidas foi necessário a utilização do suporte apresentado na Figura 3.22. Esse suporte foi necessário para fixação e inclinação da ferramenta dentro da máquina e a inclinação foi necessária devido ao ângulo de folga da ferramenta, que é igual a  $7^{\circ}$  e, por isso, exige aplicação de uma inclinação  $14^{\circ}$  para avaliação da superfície principal de corte.

Figura 3.22 - Suporte inclinável utilizado para avaliação da ferramenta no MEV



Além disso, nesse trabalho não foi possível utilizar o MEV nos CPs, uma vez que, o material empregado na fabricação dos corpos de prova apresenta uma baixa condução elétrica, característica essencial para avaliação via MEV.

### 3.3.5 Avaliação de força de Usinagem

A avaliação da força de corte foi realizada por meio de uma célula de carga do modelo MP, marca R&S<sup>®</sup>, faixa nominal de 200 N e sensibilidade de 2 mV/V, sendo que foram coletadas informações apenas no sentido positivo. O procedimento de calibração desse equipamento foi realizado conforme apresentado por Oliveira (2020), em que foi calibrado estatisticamente por toda sua faixa nominal por meio de 21 massas padrão no sentido crescente e decrescente, utilizando uma taxa de aquisição de 1 kHz em uma avaliação de 5 segundos por massa adicionada. Ao final da coleta das informações, foi gerada uma curva de calibração por regressão linear dos resultados, e conseqüentemente, uma associação dos valores de massa e tensão resultante. O resultado é apresentado na equação 3.3.

$$f(V) = 19.595,57V + 50,62[N] \quad (3.3)$$

A coleta das informações de força no CP foi realizada aproximadamente três segundos após o início do contado da ferramenta de corte e CP, sendo coletado 2 000 pontos em dois segundos de análise, na qual o término da coleta de informações ocorreu de 3 s a 20 s da conclusão da usinagem do componente. Além disso, todas as informações foram coletadas por meio do *software* LabView SignalExpress 3.0<sup>®</sup> e esse aplicativo foi utilizado exclusivamente para coleta das informações de tensão resultante. A conversão de tensão elétrica para força, em conjunto do tratamento estatístico, foi realizada no Excel<sup>®</sup>.

### 3.3.6 Resumo dos parâmetros de entrada e saída da pesquisa

Nessa seção será apresentada um resumo geral dos parâmetros de controle e principais resultados avaliados nessa pesquisa, na qual as principais informações estão contida no Quadro 3.5, sendo essa uma compilação dos Quadro 3.2 e Quadro 3.3 em conjunto dos procedimentos exibidos nos tópicos 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4 e 3.3.5.

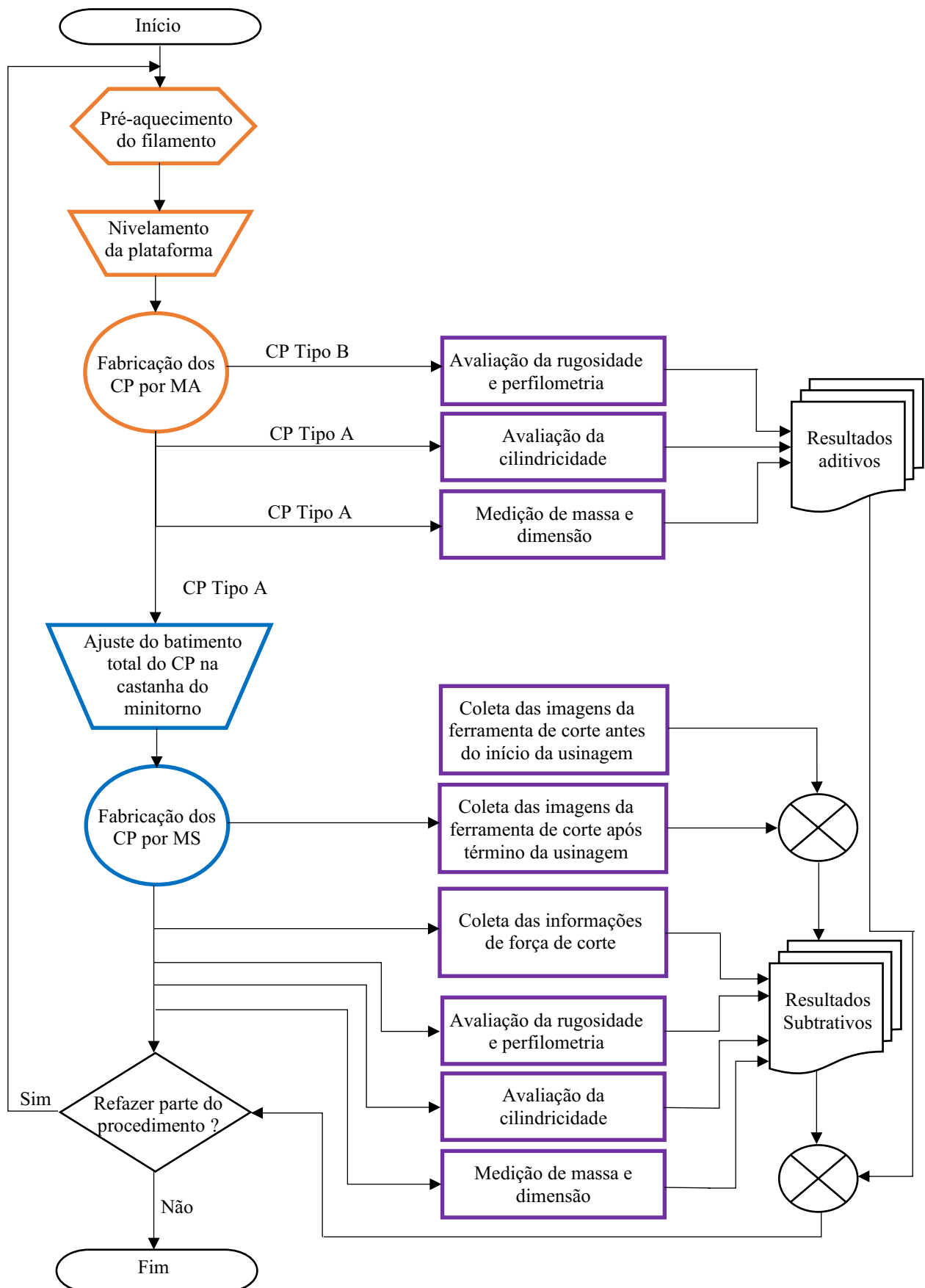


Quadro 3.5 - Resumo geral dos parâmetros aditivos e subtrativos de entrada e saída aplicados na pesquisa

<b>Tipo</b>	<b>Parâmetros de entrada</b>	<b>Valores</b>	<b>Parâmetros de saída</b>
Aditivo	Espessura de camada [mm]	0,10 / 0,15 / 0,30	Rugosidade: Ra, Rz e Rq Distribuição: Rku e Rsk Perfilometria: Sa e Sq Cilindricidade: CLYt Distribuição Rku e Rsk
	Temperatura da plataforma [°C - °C]	0-0/50-60/90-100	
	Temperatura de extrusão [°C]	210 / 220 / 240	
Subtrativo	Velocidade de corte [m/min]	20 / 35 / 50	Rugosidade: Ra, Rz e Rq Distribuição Rku e Rsk Perfilometria: Sa e Sq Cilindricidade: CLYt Dinâmica: Força de corte Imagem: MEV da ferramenta
	Avanço [mm/volta]	0,05 / 0,10 / 0,15	
	Profundidade de corte [mm]	0,2 / 0,4 / 0,6	

Além disso, conforme já abordado nas seções 3.1.5 e 3.2.4, não foi aplicada uma modificação simultânea de dois parâmetros de entrada, ou seja, mediante modificação de um parâmetro para avaliação do seu efeito, os demais foram ajustados para seus respectivos valores padrões. Assim o valor padrão da espessura de camada foi de 0,15 mm, temperatura da plataforma foi de 50 °C na primeira camada e 60 ° nas posteriores, temperatura de extrusão foi de 220 °C. Para os parâmetros subtrativos, os valores foram de velocidade de corte de 35 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade de corte de 0,4 mm. Ademais, na Figura 3.23 é apresentado um fluxograma das principais etapas do processo de desenvolvimento experimental dessa pesquisa, em que a cor laranja foi utilizada para identificar a seção 3.1 Fabricação dos CP por MA, a cor azul para indicar a seção 3.2 Fabricação dos CP por MS, enquanto o roxo foi utilizado para sinalizar a seção 3.3 Ensaio não destrutivo.

Figura 3.23 Fluxograma das principais etapas do material e métodos, sendo utilizado a cor laranja para representar a seção de MA, azul para seção de MS e roxo para de ensaios não destrutivos.



## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos nos procedimentos experimentais descritos na seção 3 desse trabalho. Esses resultados foram divididos em três seções, 4.1 Manufatura Aditiva, em que foram utilizados a espessura de camada, temperatura da plataforma e temperatura de extrusão como parâmetro de entrada, enquanto as tolerâncias dimensionais, microgeometria e macrogeometria como parâmetros de saída. Em relação a seção 4.2 Manufatura subtrativa, foram utilizados a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte como parâmetros de entrada, enquanto as tolerâncias dimensionais, microgeometria, macrogeometria, força de corte e desgaste da ferramenta foram os parâmetros de saída. Finalmente, para seção 4.3 Manufatura Híbrida, os parâmetros de entrada foram todos os parâmetros de controle, aditivo e subtrativo, previamente citados, sendo que sua avaliação foi realizada por meio das tolerâncias dimensionais, microgeometria, macrogeometria, força de corte, desgaste da ferramenta e tempo de fabricação, conforme apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 Fluxo das etapas de apresentação dos resultados e discussões da manufatura aditiva, subtrativa e híbrida.

<b>Parâmetros de entrada:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espessura de camada</li> <li>• Temperatura da plataforma</li> <li>• Temperatura de extrusão</li> </ul>	<b>Parâmetros de entrada:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de corte</li> <li>• Avanço</li> <li>• Profundidade de corte</li> </ul>	<b>Parâmetros de entrada:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espessura de camada</li> <li>• Temperatura da plataforma</li> <li>• Temperatura de extrusão</li> <li>• Velocidade de corte</li> <li>• Avanço</li> <li>• Profundidade de corte</li> </ul>
<b>4.1 Resultados e discussões da manufatura aditiva</b>	<b>4.2 Resultados e discussões da manufatura subtrativa</b>	<b>4.3 Discussões dos resultados da manufatura aditiva e subtrativa em um contexto híbrido</b>
<b>Parâmetros de saída:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolerâncias dimensionais</li> <li>• Microgeometria</li> <li>• Macrogeometria</li> </ul>	<b>Parâmetros de saída:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolerâncias dimensionais</li> <li>• Microgeometria</li> <li>• Macrogeometria</li> <li>• Força de corte</li> <li>• Desgaste da ferramenta</li> </ul>	<b>Parâmetros de saída:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolerâncias dimensionais</li> <li>• Microgeometria</li> <li>• Macrogeometria</li> <li>• Força de corte</li> <li>• Desgaste da ferramenta</li> <li>• Tempo de fabricação</li> </ul>

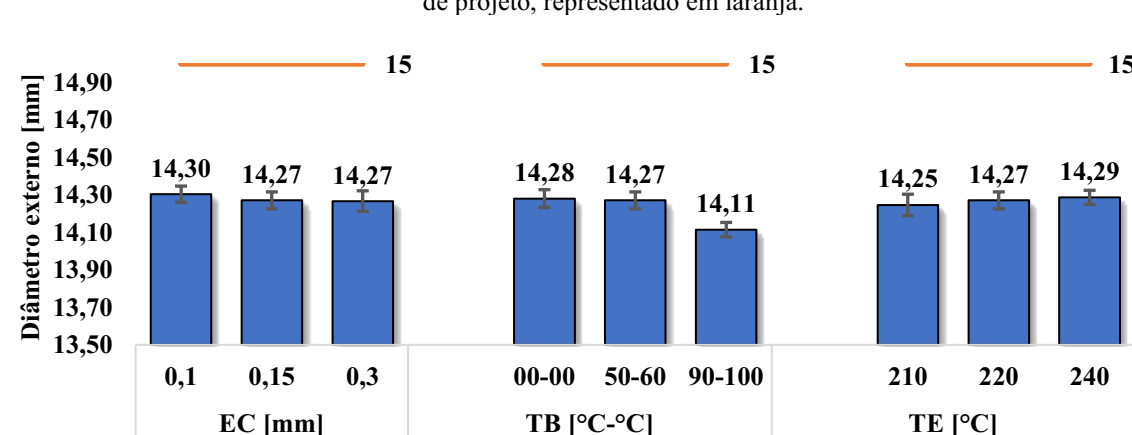
## 4.1 MANUFATURA ADITIVA

Este item foi subdividido em três seções: 4.1.1 Dimensões dos CPs, 4.1.2, Circularidade e Cilindricidade e 4.1.3 Rugosidade e Perfilometria.

### 4.1.1 Dimensões dos CPs

A avaliação da dimensão dos CPs após MA revelou uma divergência entre o diâmetro final e o projetado, sendo esta característica acentuada para os CPs impressos com uma temperatura de base superior, conforme apresentado na Figura 4.2, em que as siglas EC, TB e TE foram utilizadas para identificar os parâmetros de controle espessura de camada, Temperatura da plataforma e Temperatura de extrusão, respectivamente.

Figura 4.2 – Diâmetro externo dos corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE) em comparação com o diâmetro de projeto, representado em laranja.



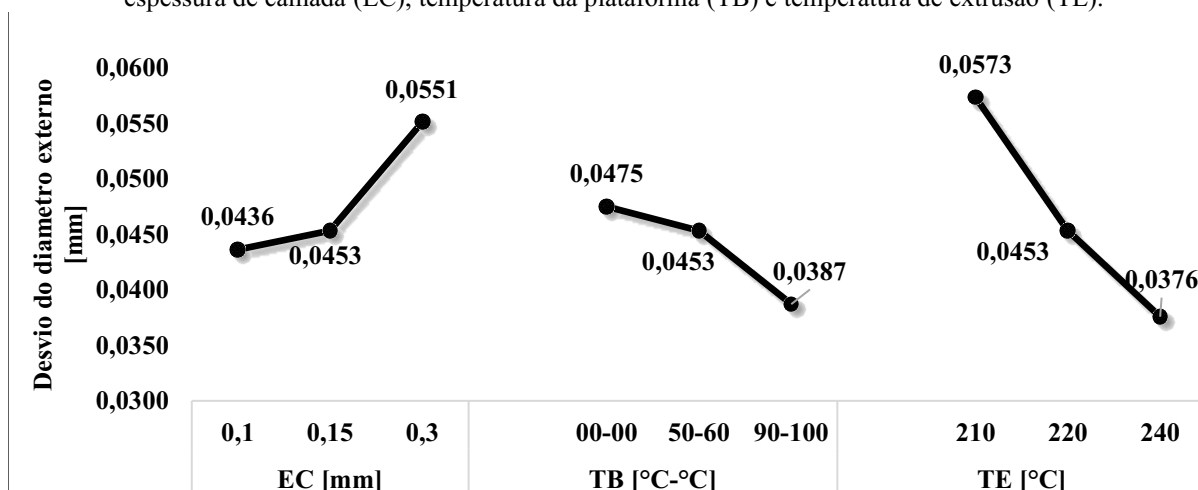
Conforme apresentado na Figura 4.2, todos CPs manifestaram uma divergência superior a 0,6 mm do diâmetro definido no projeto. Essa discrepância pode ser correlacionada com a deposição de uma quantidade de material inferior ao esperado na extrusão e, consequentemente, reduzindo o diâmetro médio de todos os CPs extrudados para 14,26 mm.

Além das discrepâncias em função da quantidade de material extrudado, as distorções térmicas ocasionadas pelo aumento da TB também provocaram distorção do diâmetro, em que esse parâmetro foi responsável pelo menor diâmetro de todos CPs fabricados, divergindo em 0,15 mm da média dos demais corpos extrudados. Enquanto isso, a temperatura de extrusão, apesar de também aumentar a quantidade de energia inserida no sistema, não provocou

modificações no diâmetro externo, sendo que o possível motivo é a pequena alteração de energia utilizada para o aquecimento do bocal à 220 °C e 240 °C.

Além disso, foi possível observar que o desvio dimensional aumentou proporcionalmente a espessura de camada, fator provavelmente correlacionado com o aumento da porosidade interna ocasionada pela aplicação de camadas com espessura elevada. O mesmo conceito pode ser aplicado para a redução do desvio em função do aumento da energia térmica aplicada no sistema. Nesse caso, apesar de aplicar a mesma EC, a aplicação da TB e TE em valores elevados facilita a adesão do filamento recém depositado a camada anterior, além disso, o aumento da TE também proporciona maior fluidez ao material depositado e, em virtude disso, ocorre a redução da porosidade do CP. A representação gráfica da evolução dos desvios é exibida na Figura 4.3 em que é apresentado apenas os desvios de medição da avaliação apresentada na Figura 4.2.

Figura 4.3 – Desvio do diâmetro externo dos corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE).



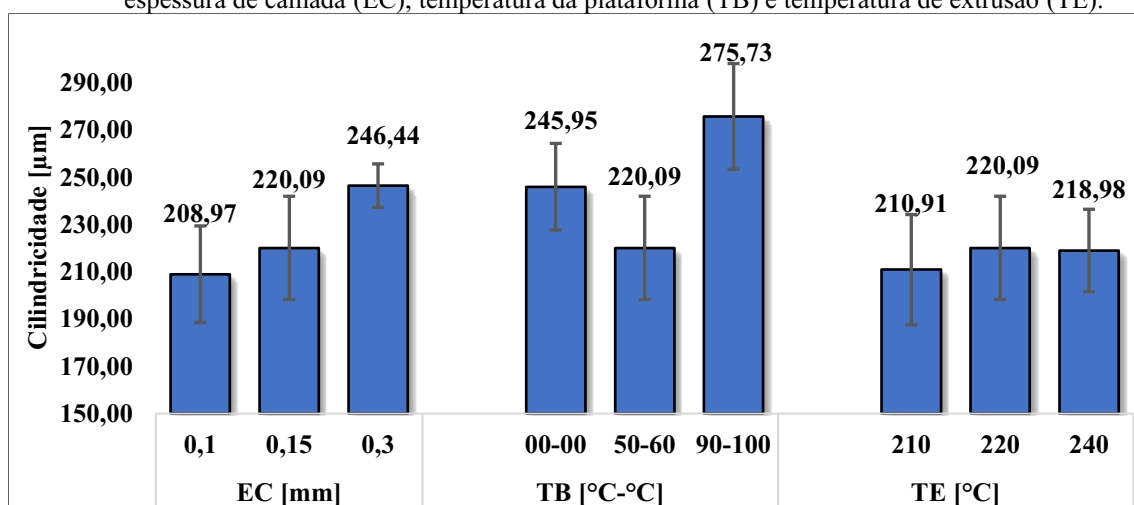
Finalmente, foi possível associar cada conjunto de CPs a uma tolerância IT. Identificando IT10 para todos os corpos fabricados por MA, exceto os manufaturados com TE de 240°, em que foram classificados com IT9. Essa classificação está em acordo com os trabalhos publicados por Rosa, (2019) e Giannini, (2020).

#### 4.1.2 Cilindricidade

Os resultados de cilindridade indicaram valores de CYLt próximos de 230 µm para os CPs fabricados por MA, além disso, mediante aplicação do erro associado a cada resultado

encontrado, foi considerado inviável a discriminação estatística dos valores encontrados para a evolução da espessura de camada e temperatura de extrusão. Entretanto, foi possível perceber uma tendência de redução da cilindridade em função da diminuição da espessura de camada, uma possível explicação para este fenômeno é o aumento do controle geométrico ocasionado pela deposição de uma quantidade inferior de material por camada, sendo essa propensão apresentada Figura 4.4.

Figura 4.4 - Cilindridade (CLYt) para corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE).



O incremento da temperatura da plataforma ocasionou no aumento da cilindridade dos CPs, uma possível explicação para esse fenômeno pode ser realizada pela permanência do CP a temperatura superiores à sua transição vítrea e, por conseguinte, dificultando o controle geométrico do processo. Em relação ao caso em que não foi aplicada energia térmica pela plataforma, como TB 0-0 °C, esta divergência de cilindridade pode ser associada a significativa diferença de temperatura das camadas já depositadas, que neste caso não são aquecidas, e o filamento recém depositado à 220 °C.

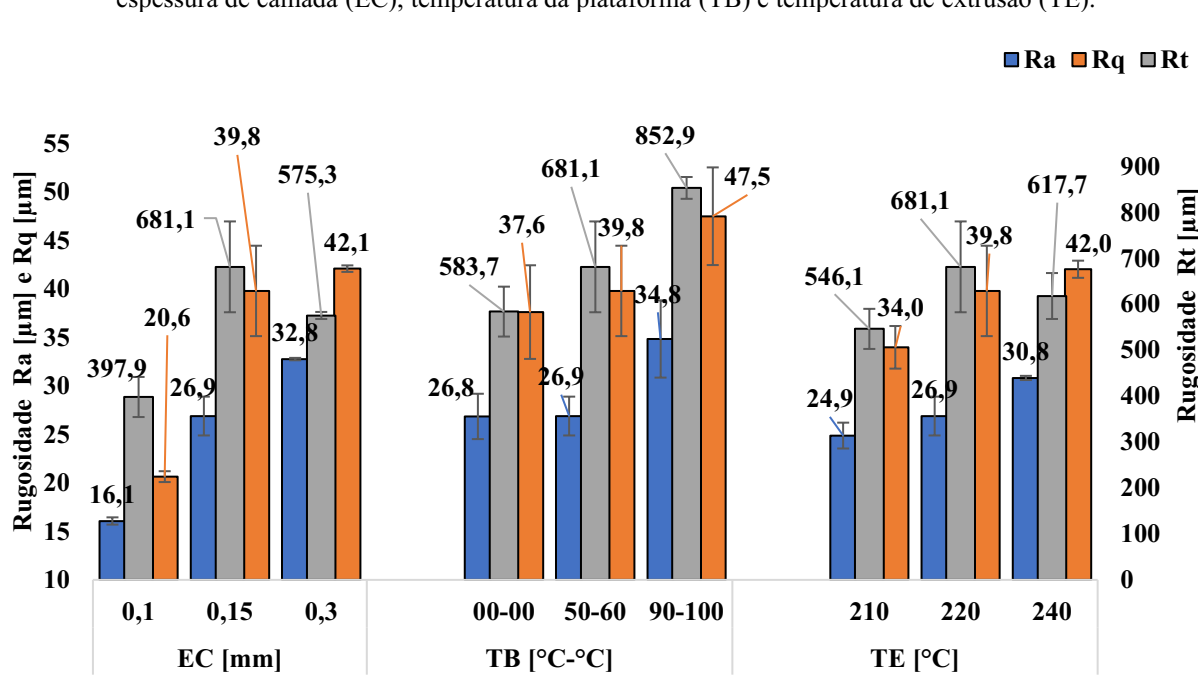
#### 4.1.3 Rugosidade e Perfilometria

A avaliação da rugosidade indicou uma proporcionalidade entre a espessura de camada e rugosidade Ra, sendo o conjunto dos CPs fabricados com a menor EC, 0,10 mm, aqueles que apresentaram a melhor rugosidade em Ra, Rq e Rt. Todavia, ao contrário da menor EC, a maior temperatura da plataforma, entre 90 °C e 100 °C, foi responsável pelos maiores valores de

rugosidade em todos os parâmetros analisados, sendo que todas essas características são apresentadas na Figura 4.5.

Além da proporcionalidade entre EC e Ra, foi possível realizar uma correlação semelhante entre a rugosidade Ra e Rt com a temperatura de extrusão, entretanto, devido à magnitude do desvio associado a medida, só foi possível afirmar a tendência de aumento da rugosidade com incremento da temperatura.

Figura 4.5 – Média das variações de relevo microgeométricos (Ra), desvio padrão da distribuição da altura (Rq) e altura total do perfil de rugosidade (Rt) para corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE).

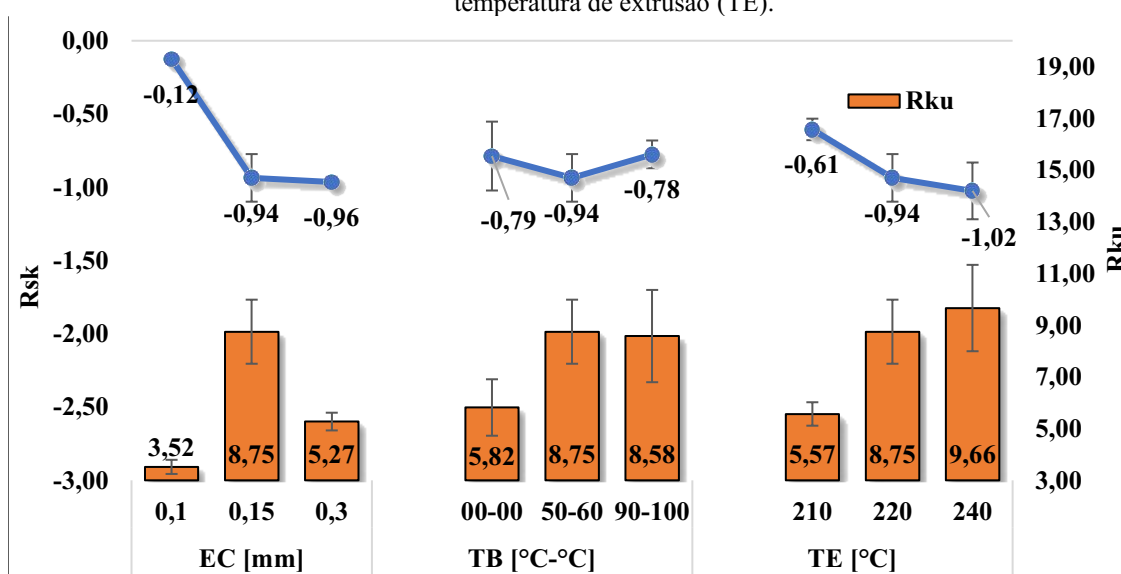


Dessa forma, os valores de rugosidade, Ra e Rt, dos CPs fabricados com parâmetros de impressão padrão, ou seja, espessura de camada de 0,15 mm, temperatura da plataforma de 50 e 60 °C, e temperatura de extrusão de 220 °C, apresentaram equivalência aos publicados por Ferreira *et al.* (2019) e Oliveira (2020). Além disso, a tendência de redução da rugosidade em função da EC também foi observada pelos autores Corral *et al.* (2021), todavia, os valores de rugosidade Ra obtidos nessa pesquisa foram superiores ao apresentado pelos autores. Essa discrepância pode ser justificada pela diferença de maquinário, já que foi aplicado um modelo CL2 Pro+® nessa pesquisa, enquanto a máquina Sigma R17, da empresa BCN 3D Technologies®, foi aplicada no trabalho publicado por Corral *et al.* (2021).

Além disso, em conjunto aos parâmetros de rugosidade, foi realizada uma análise da distribuição Rsk e Rku dos CPs. Essa análise foi representada graficamente na Figura 4.6, na

qual é possível observar que os CPs fabricados com EC igual a 0,10 mm obtiveram os valores mais próximos da distribuição simétrica, em que os Rsk e Rku são iguais a 0 e 3, respectivamente. Além disso, foi possível perceber a tendência de aumento do Rku e a diminuição do Rsk com incremento da temperatura de extrusão, porém, em função do erro associado, não foi possível diferenciar estatisticamente a evolução, apenas que as menores TE e EC foram responsáveis pelos valores mais próximos da distribuição simétrica entre todos os conjuntos de CP avaliados

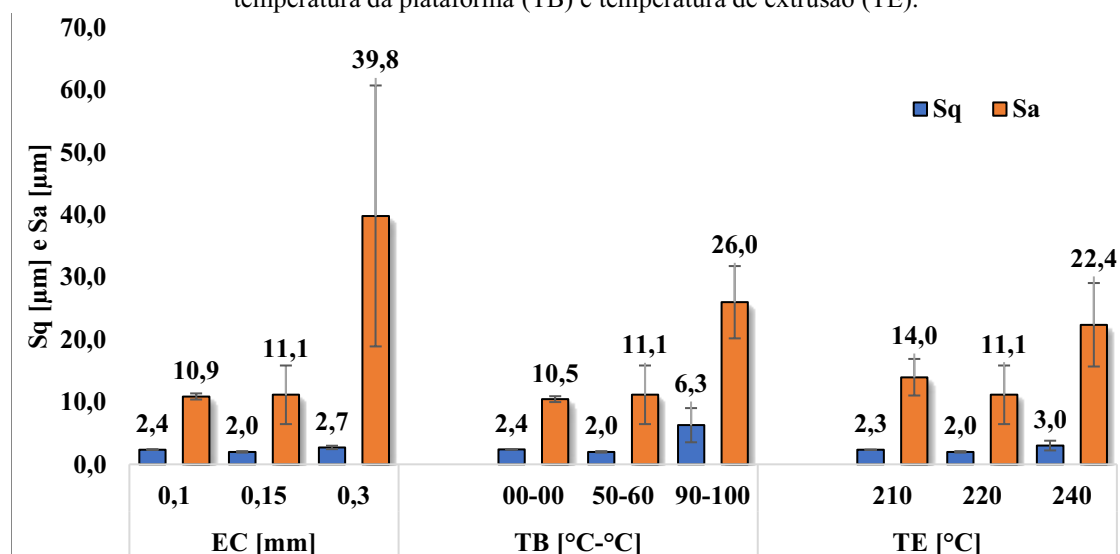
Figura 4.6 – Distribuição estatística descritiva da assimetria (Rsk) e curtose (Rku) para corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE).



Além da avaliação bidimensional, os CP também foram analisados em seus aspectos tridimensionais, sendo esses resultados apresentados na Figura 4.7, em que, ao contrário das informações geradas nas análises bidimensionais, não foi possível associar a evolução das características superficiais e os parâmetros de controle. Entretanto, é possível atribuir o pior desempenho, em Sa e Sq, aos conjuntos fabricados com os parâmetros EC igual a 0,3 e TB igual a 90-100 °C, respectivamente, além disso, esses conjuntos também os responsáveis pelos maiores desvios.



Figura 4.7 Aspectos tridimensionais de média aritmética da altura dos picos (Isso) e altura média elevada ao quadrado (Sq) para corpos de prova processados alterando os parâmetros aditivos de espessura de camada (EC), temperatura da plataforma (TB) e temperatura de extrusão (TE).



## 4.2 MANUFATURA SUBTRATIVA

Este item foi subdividido em cinco seções: 4.2.1 Dimensões dos CPs, 4.2.2 Circularidade e cilindricidade, 4.2.3 Rugosidade e Perfilometria, 4.2.4, Força de corte e 4.2.5 Desgaste da ferramenta.

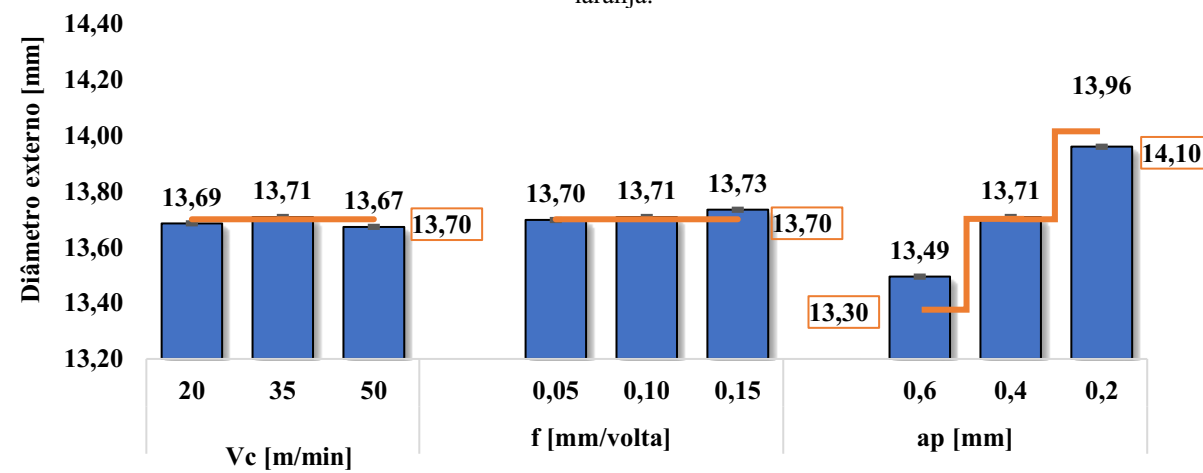
### 4.2.1 Dimensões dos corpos de prova

Os resultados dimensionais dos CPs após MS foram analisados depois de uma reavaliação do diâmetro de projeto. Inicialmente, o diâmetro esperado das peças aditivas era de 15,00 mm, porém, devido às limitações do processo aditivo, o componente final apresentou diâmetro externo próximo a 14,50 mm. Dessa forma, foi necessário modificar o diâmetro do projeto subtrativo para a adequação da profundidade de corte (ap) previamente definida. Conseqüentemente, foi definindo o novo diâmetro de projeto para 13,7 mm para avaliação do avanço (f) e velocidade de corte (Vc), além de 14,1 mm, 13,7 mm e 13,3 mm para a avaliação da profundidade de corte (ap) de 0,2 mm, 0,4 mm e 0,6 mm, respectivamente.

Nesse sentido, conforme resultados apresentados na Figura 4.8, a usinagem dos CP ocasionou aumento do controle dimensional das peças fabricadas por MS. Além disso, os desvios do diâmetro nominal em relação ao de projeto não foram superiores as 0,2 mm, em que o maior valor encontrado foi na avaliação da ap de 0,6 mm, fator provavelmente correlacionado

com a remoção do preenchimento interno do CP, gerado pela equivalência entre a espessura de contorno, de 0,8 mm, e profundidade de corte em conjunto do desvio de cilindridade do componente pré subtração, conforme apresentado na seção 4.1.3.

Figura 4.8 Diâmetro externo dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ), sendo o diâmetro de projeto representado pela linha em laranja.

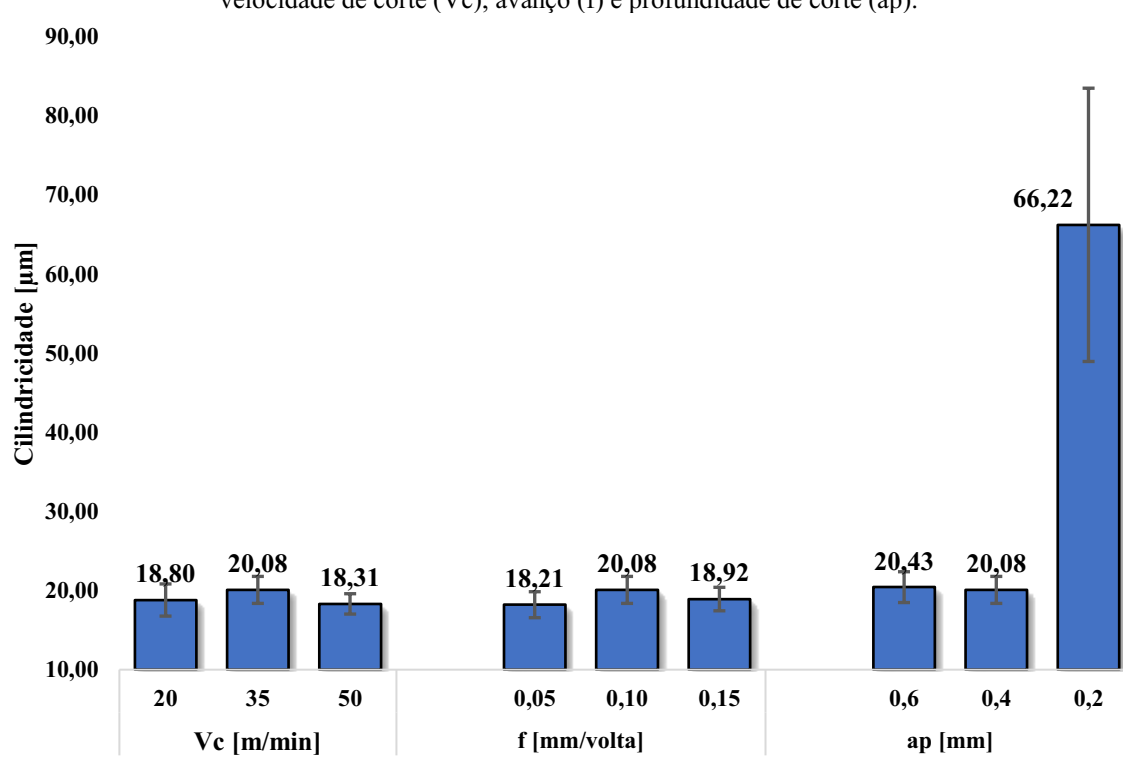


Ademais, é possível perceber um decréscimo das tolerâncias dimensionais, em que foram utilizadas as informações contidas na norma ISO 286-1 para associar as tolerâncias com os correspondentes valores IT, atribuindo IT4 a todos CPs usinados, valor esse condizente com os encontrados por Giannini (2020) e Corral *et al.*, 2021.

#### 4.2.2 Cilindricidade

A aplicação de MS foi capaz de reduzir os desvios de cilindridade (CYLt), modificando de valores próximos a 230  $\mu\text{m}$  na MA, para aproximadamente 20  $\mu\text{m}$  na MS, sendo esses resultados apresentados na Figura 4.9. Todavia, a fabricação dos CP com  $a_p$  igual a 0,2 mm, resultou nos piores resultados de cilindridade de todos os corpos fabricados por MS, além do maior desvio de medição de todas as análises de cilindridade realizada. Esses resultados ainda são menores que os encontrados na MA, porém muito distantes dos encontrados na avaliação dos outros parâmetros MS.

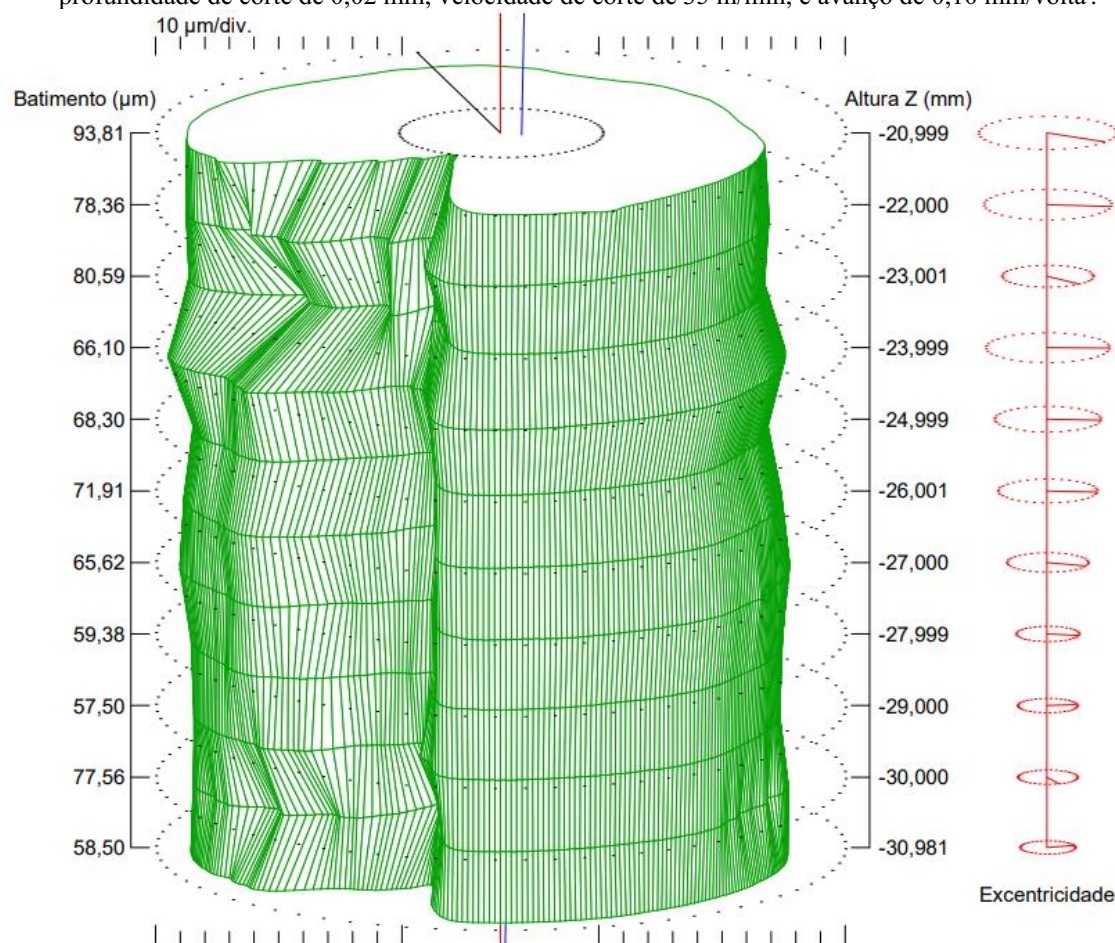
Figura 4.9 Cilindricidade (CLYt) dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ).



Um dos principais fatores que afetaram a cilindridade das peças fabricadas com  $a_p$  igual a 0,2 mm é a falha da usinagem em algumas regiões, sendo que essas regiões não foram acessadas pela ferramenta de corte em função dos desvios de cilindridade do CP fabricado por MA. Esse desvio de cilindridade, conforme apresentado na 4.1.3, foi equivalente a profundidade de corte mínima utilizada nos CPs.

Além disso, visando a exploração do fenômeno da falha de usinagem gerada nos CPs fabricados com  $a_p$  de 0,2 mm, é apresentada na Figura 4.10 a representação gráfica gerada pelo *software* Taylor Hobson Ultra<sup>®</sup> da terceira análise do terceiro corpo de prova utilizado para avaliação da profundidade de corte com 0,2 mm, sendo que foi utilizada uma escala distinta para a representação da altura (mm) e deformações radiais (10 μm/div.).

Figura 4.10 Representação dos desvios de cilindridade da terceira replica do corpo de prova fabricado com profundidade de corte de 0,02 mm, velocidade de corte de 35 m/min, e avanço de 0,10 mm/volta.



Por meio da representação gráfica foi observado a existência de um vale em uma seção do CP, sendo essa alteração responsável por dificultar o acesso da ferramenta ao local, e consequente falha na remoção de material, que é provavelmente responsável pelos resultados de cilindridade intermediários entre as demais peças fabricadas por MA e MS, além do desvio estatístico elevado. Todas as análises de todos CPs fabricados com essa profundidade apresentaram a mesma característica.

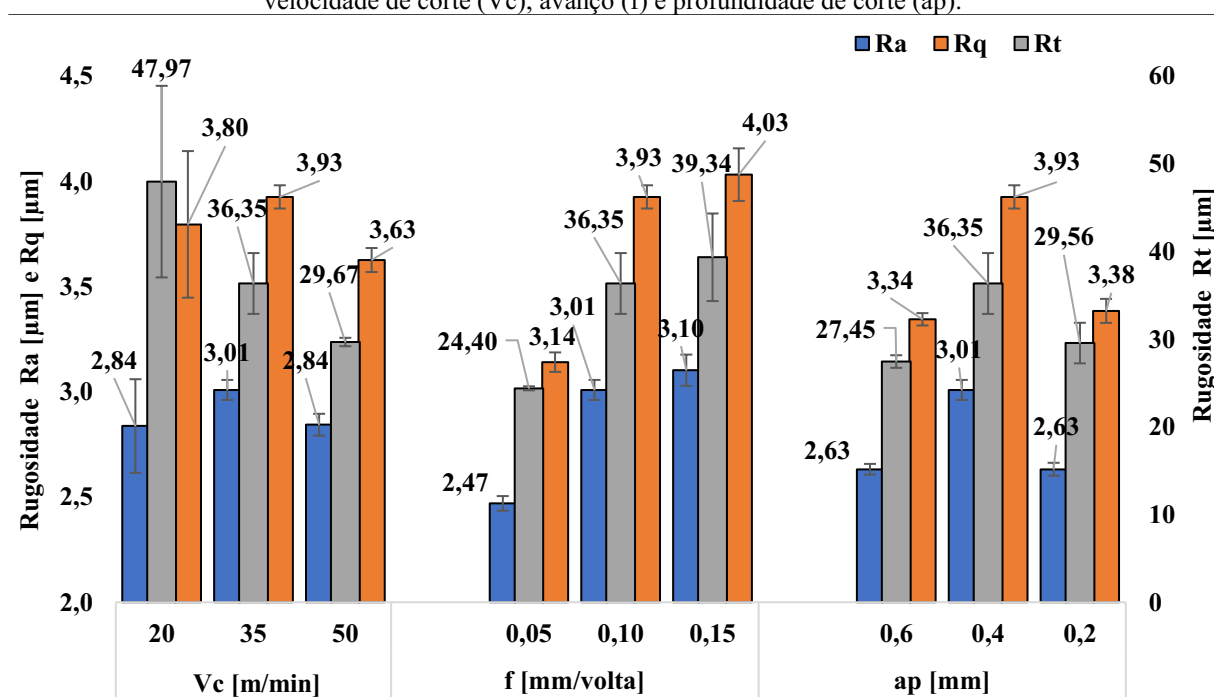
### 4.2.3 Rugosidade e Perfilometria

A avaliação da rugosidade indicou uma proporcionalidade entre velocidade de avanço e rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_t$ , sendo o conjunto dos CPs fabricados com avanço igual a 0,05 mm/volta aqueles que apresentaram a menor rugosidade em  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_t$  de todos os CPs analisados. Em relação a velocidade de corte, foi possível perceber apenas uma tendência de

redução da rugosidade  $R_t$  em função do aumento da  $V_c$ , enquanto os valores de  $R_a$  e  $R_q$  não apresentaram modificação maior que o erro estatístico associado a alteração desse parâmetro.

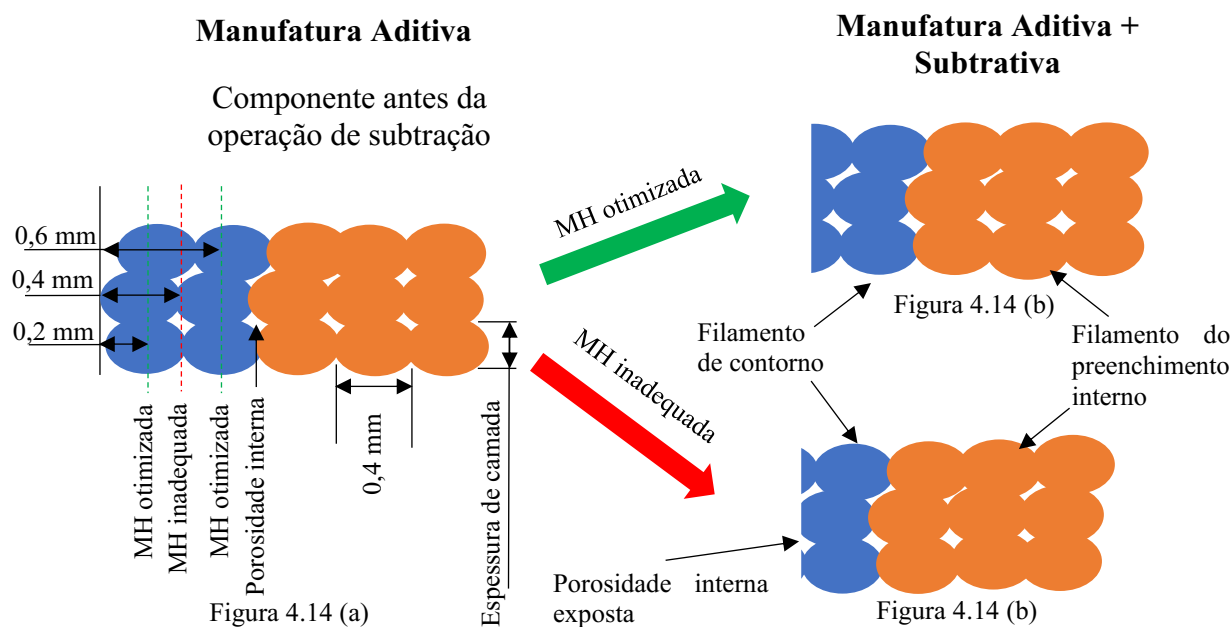
Além disso, conforme apresentado na Figura 4.11, a profundidade de corte apresentou um comportamento singular na alteração da  $a_p$ , em que a rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_t$  apresentaram valores elevados para profundidade intermediária, enquanto a  $a_p$  igual a 0,6 mm e 0,2 mm obtiveram os menores valores de rugosidade na alteração desse parâmetro, sendo que esses valores reduzidos de rugosidade foram estatisticamente iguais.

Figura 4.11 - Média das variações de relevo microgeométricos ( $R_a$ ), desvio padrão da distribuição da altura ( $R_q$ ) e altura total do perfil de rugosidade ( $R_t$ ) dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ).



Uma possível explicação para esse fenômeno é apresentada na Figura 4.12, em que três possibilidades de profundidade de corte são apresentadas, sendo utilizado 0,6 mm, 0,4 mm e 0,2 mm, que representam 150 %, 100 % e 50 % da espessura de deposição, respectivamente. Além disso, na Figura 4.12, são apresentados três  $a_p$  possíveis, porém apenas dois resultados apresentados, na qual essa escolha de representação foi realizada em função da equivalência dos resultados encontrados para as profundidades de corte de 0,6 mm e 0,2 mm, conforme resultados apresentados na Figura 4.11.

Figura 4.12 - Representação gráfica do efeito da profundidade de corte na rugosidade final do CP



Conforme apresentado na Figura 4.12, a aplicação de uma profundidade de corte múltipla da espessura de deposição pode acarretar a exposição da porosidade interna inerente do processo aditivo por FFF, de acordo com o apresentado na Figura 4.12 (c). Nesse sentido, os melhores valores de rugosidade são esperados da profundidade de corte múltipla da metade da espessura, ou seja, 50% e 150%. Todavia, deve ser considerado a espessura de camada, uma vez que, para os CPs aplicados nessa pesquisa, a aplicação de um ap superior a 200% da espessura de filamento poderia acarretar a exposição do preenchimento interno do componente.

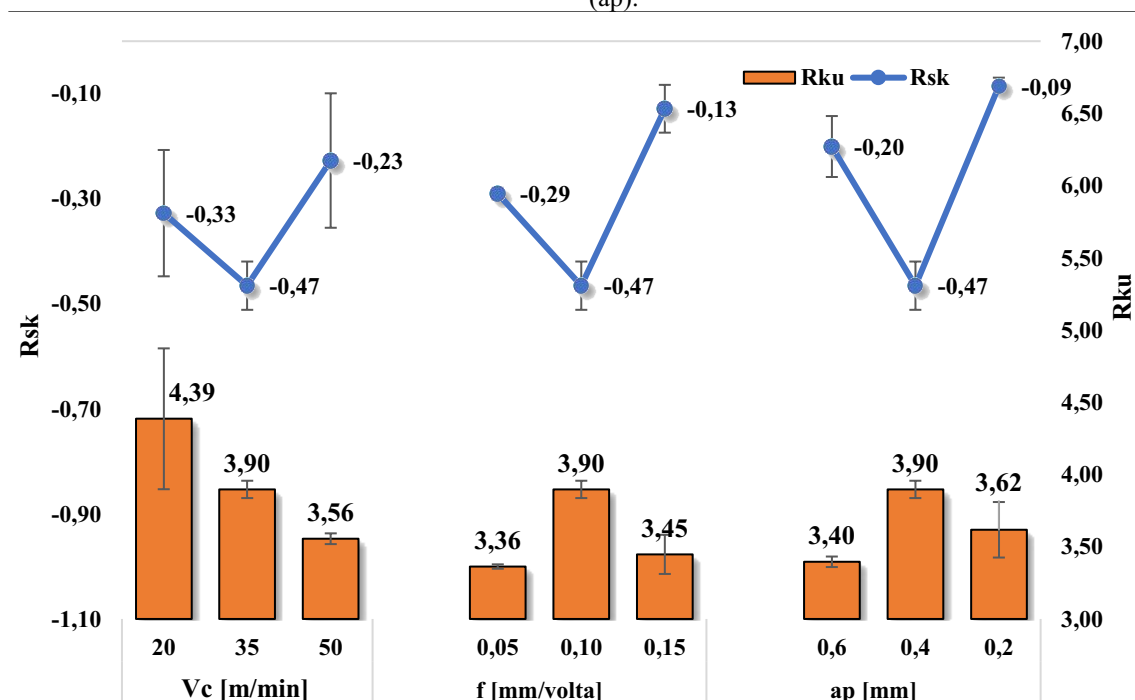
Os resultados de rugosidade dessa pesquisa convergem com o apresentado no trabalho de Oliveira (2020) para os parâmetros de 35 m/min e avanço de 0,10 mm de volta. Em relação a profundidade de corte, a tendência encontrada pelo autor é diferente da identificada nessa pesquisa, todavia, essa divergência pode estar correlacionada os valores de profundidade escolhidos na pesquisa do autor, em que não foram correlacionados com a espessura do filamento.

Apesar da convergência das tendências e valores da rugosidade encontrada no trabalho de Oliveira (2020), o mesmo não pode ser afirmado para a pesquisa de Guo *et al.* (2021). No trabalho desse autor, foi observado o preenchimento do vazio interno recém exposto por material deformado, além do aumento da rugosidade em função da aplicação de um material compósito, conforme apresentado na Figura 2.29. Essas diferenças podem ser justificadas em

função da aplicação de uma matriz polimérica diferente, sendo que o material PEEK aplicado pelo autor, detentor de módulo de elasticidade e distorção máxima superior a matriz de PLA aplicada nesse trabalho.

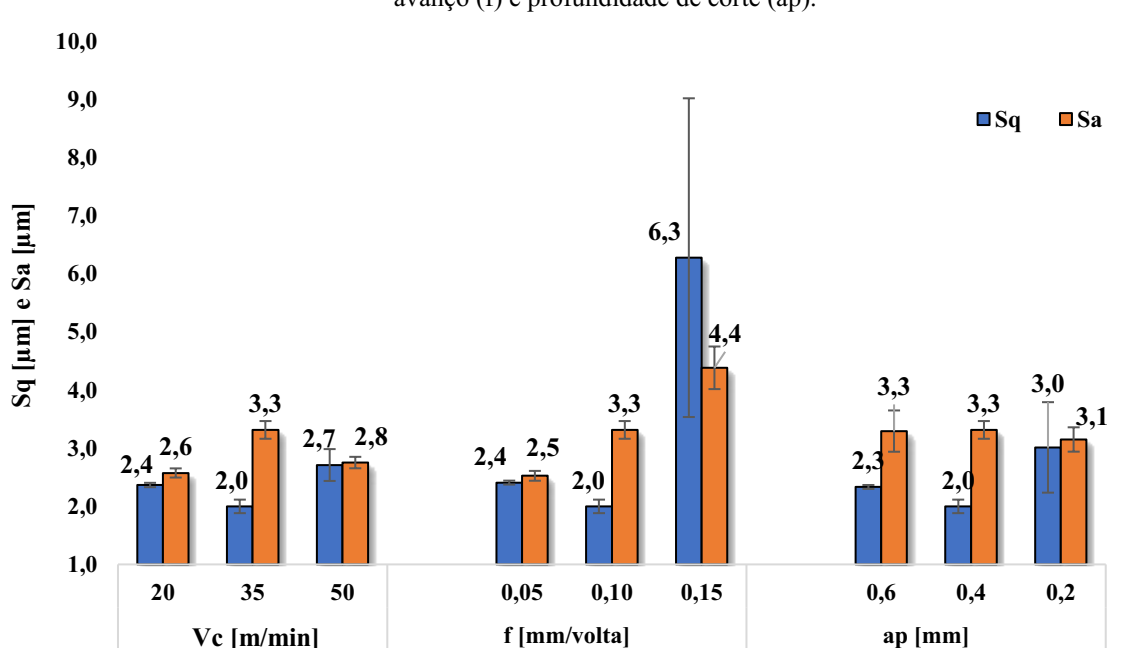
Além do seu efeito na rugosidade, a profundidade de corte apresentou um efeito semelhante na alteração da assimetria bidimensional dos CPs analisados, além do Rsk mais próximo de zero ser identificado para ap de 0,2 mm. Enquanto isso, a modificação da Va gerou uma tendência semelhante a ap dos CPs, em que os extremos obtiveram as maiores assimetria e menor curtoses. Além do Rsk mais próximo de zero ser encontrado para os conjuntos usinados com a maior Va. Em contrapartida, não foi possível diferenciar estatisticamente os valores de Rsk gerados pela alteração da Vc, porém pôde ser observado que a elevação desse parâmetro resultou na tendência de diminuição da curtoses. Todas essas informações são apresentadas na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Distribuição estatística descritiva da assimetria (Rsk) e curtose (Rku) dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte (Vc), avanço (f) e profundidade de corte (ap).



Apesar dos efeitos da ap na rugosidade bidimensional, não foi possível encontrar a mesma influência nas características tridimensionais, todavia, conforme as características bidimensionais, a aplicação da usinagem reduziu a média aritmética da avaliação tridimensional por altura dos picos, Sa, todavia, não foi possível observar modificação maior que o erro estatístico associado à média quadrática Sq, conforme apresentado na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Aspectos tridimensionais de média aritmética da altura dos picos ( $S_a$ ) e altura média elevada ao quadrado ( $S_q$ ) dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ).



A evolução da rugosidade  $S_a$  em função da velocidade de avanço foi a única correlação entre parâmetros de corte e aspectos tridimensionais encontrado. Essa evolução da rugosidade tridimensional foi semelhante à bidimensional, em que a redução da velocidade de avanço diminuiu a rugosidade.

Ademais, apesar da dificuldade em encontrar tendências para evolução de outros parâmetros, foi possível observar um aumento do desvio estatístico para aplicação do avanço de 0,15 m/min, efeito provavelmente ocasionado pelo aumento da força de corte com evolução desse parâmetro. A  $a_p$  igual a 0,2 mm apresentou desvio semelhante, possivelmente correlacionado com as falhas em usinar todo corpo de prova, característica presente devido a equivalência estatística entre o desvio de cilindricidade e  $a_p$  mínima de corte.

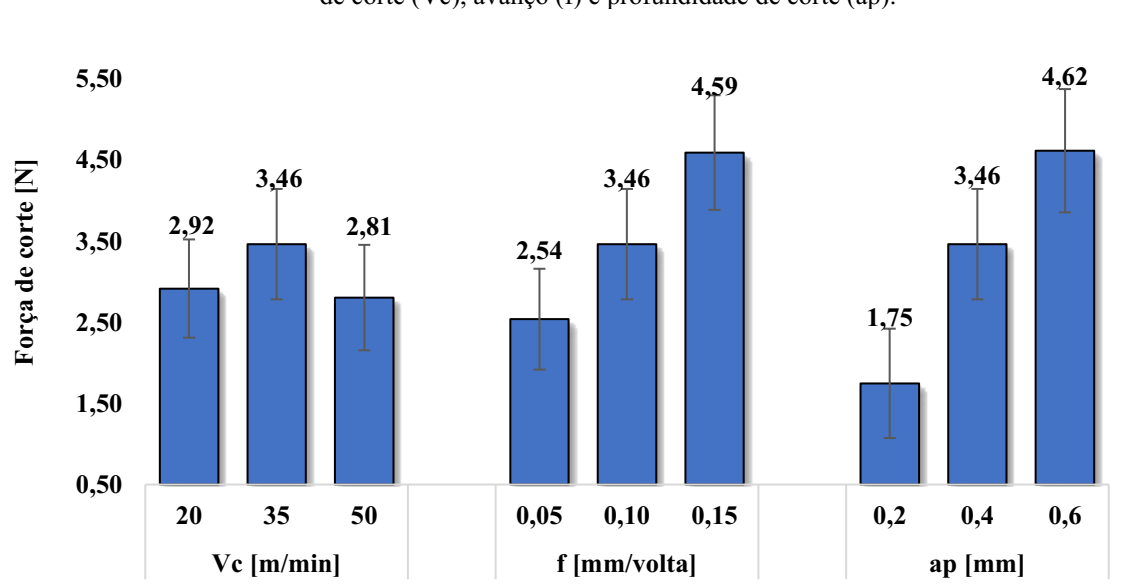
#### 4.2.4 Força de corte

A avaliação pelo dinamômetro apresentou o aumento da força em função do incremento da profundidade de corte e velocidade de avanço, porém não foi observado modificação superior ao erro estatístico da força em função da velocidade de corte, conforme apresentado na Figura 4.15. Esse comportamento está condizente com apresentado por Oliveira (2020), porém, com o valor da força inferior em todos os níveis, sendo que essa queda está



provavelmente correlacionada com a presença das partículas de fibra de carbono, que facilitam o cisalhamento da matriz polimérica de PLA. Esses conceitos foram abordados previamente pelos autores Ferreira *et al.* (2020).

Figura 4.15- Força de corte dos corpos de prova processados alterando os parâmetros subtrativos de velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $ap$ ).

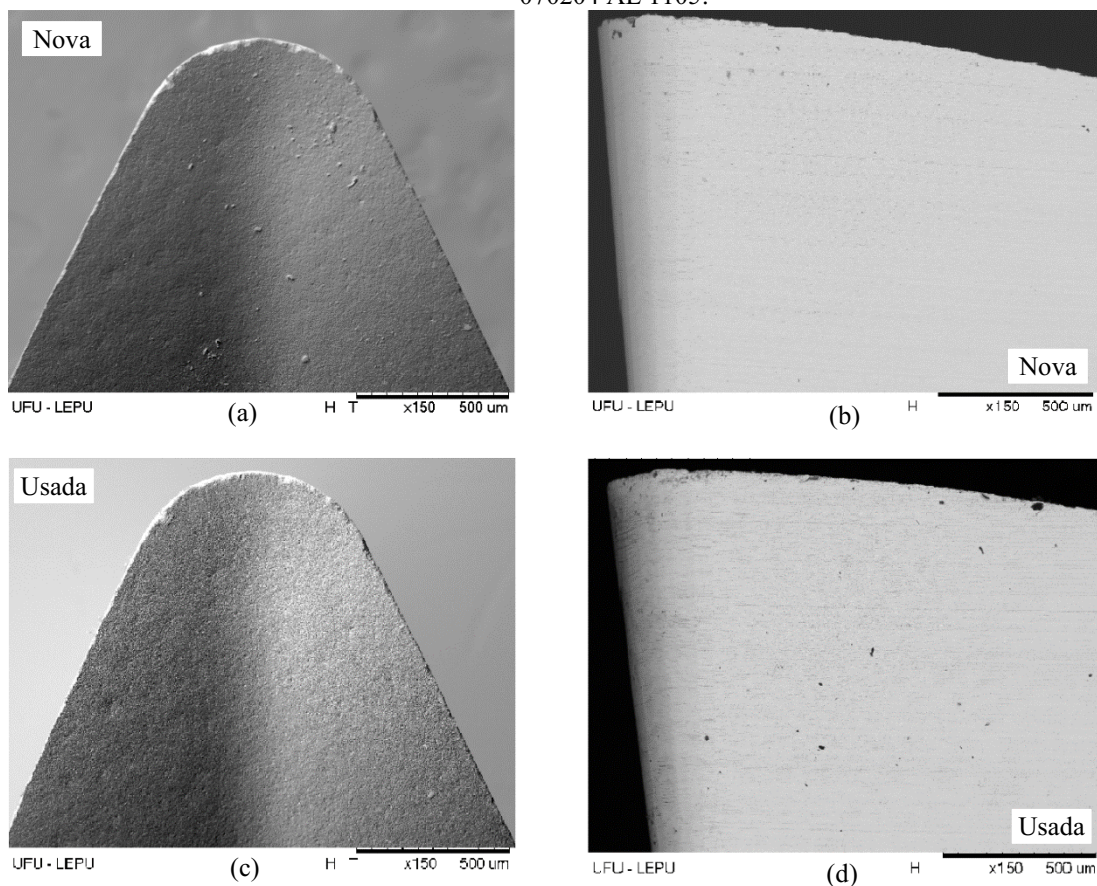


Além disso, a tendência de evolução da força com o aumento da espessura de corte está condizente com o comportamento encontrado por Chabbi *et al.*, 2017, Guo *et al.*, 2021 e Wang *et al.*, 2022. Enquanto a evolução da força de corte em função do avanço está condizente com encontrado por Wang *et al.*, 2016, Slamani *et al.*, 2019 e Zeng *et al.*, 2022.

#### 4.2.5 Desgaste da ferramenta

A comparação entre imagens de MEV sugerem que ao longo dos ensaios não foi verificado desgaste da ferramenta, além de nenhuma adesão do material sobre a superfície de saída da ferramenta, conforme apresentado na Figura 4.16. Esse resultado está compatível com o encontrado por Oliveira (2020), em que foi usinado PLA puro, revelando que a adição de partículas de fibra de carbono não alterou as características de desgaste da ferramenta do processamento.

Figura 4.16 – Imagens coletadas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) das superfícies de saída antes (a) e depois da usinagem (c), além da principal de folga antes (b) e depois da usinagem (d) da ferramenta DCGX 070204 AL 1105.



Na Figura 4.16 são apresentadas as fotos no MEV anterior a usinagem, (a) e (b), e posterior manufatura, (c) e (d) da ferramenta DCGX 070204 AL, sendo aplicado uma ampliação de 150x para a superfície de saída, (a) e (c), e 100x na principal de folga, (b) e (d). Por meio da comparação das fotos da ferramenta antes e após usinagem, é possível afirmar que não ocorreu desgaste da ferramenta ou qualquer tipo de adesão de material na superfície.

Ademais, considerando pequenos comprimentos de cortes, esse resultado está condizente com os resultados encontrados nos trabalhos de Ahmad *et al.*, 2019 e Guo *et al.*, 2021. Todavia, os resultados encontrados nesse trabalho divergem do publicado por Ferreira *et al.*, 2020, em que não ocorreu desgaste para os polímeros puro, porém, foi encontrado alteração na subtração de polímero carregado de fibra de carbono. Assim, essa diferença é associada a uma discrepância da velocidade de corte aplicada, em conjunto da diferença da matriz polimérica utilizada, Poliamida 12, em oposição ao PLA utilizado nesse trabalho.

### 4.3 MANUFATURA HÍBRIDA

A avaliação da MA e MS no contexto híbrido é um dos principais objetivos dessa pesquisa, sendo essa análise realizada em função das características de fabricação como tempo e massa, além dos resultados dimensionais macro e micro geométricos dos corpos de prova produzidos.

Todas as análises realizadas nesse trabalho foram efetuadas para a MA e MS de PLA com partículas de fibras de carbono, sendo esse material pouco explorado na literatura, bem como sua aplicação na combinação dos processos em um aspecto híbrido. De tal forma, esse estudo é uma etapa introdutória para o desenvolvimento de sistemas híbridos de manufatura, assim como os trabalhos publicados por Oliveira *et al.* (2020), Ferreira *et al.* (2020), Guo *et al.* (2021) e Corral *et al.* (2021).

Em função do estado incipiente da pesquisa, a metodologia aplicada nesse estudo utilizou dois processos de MA e MS em estações de trabalho distintas. Desse modo, esse trabalho é definido conceitualmente como um processamento em múltiplos estágios, ao contrário de apenas uma etapa de processamento híbrida. Essa definição segue conforme exposto pelos autores Zhu *et al.*, (2013), Lauwers *et al.* (2014) e Sealy *et al.* (2018), em que são considerados processos híbridos apenas aqueles em que existe a união controlada e simultânea de dois ou mais sistemas de manufatura completamente acoplados.

Os resultados apresentados nessa pesquisa são condizentes com os encontrados em outros trabalhos realizados em múltiplas etapas, principalmente em função da evolução da rugosidade (FERREIRA *et al.*, 2020; CORRAL *et al.*, 2021), força (OLIVEIRA, 2020; SLAMANI *et al.*, 2019) e desgaste (OLIVEIRA, 2020).

Todos esses resultados, em adição daqueles em que não foram encontrados na literatura, serão discutidos nas seções: 4.3.1 avaliação e comparação dos aspectos de fabricação dos CPs, e 4.3.2 avaliação e comparação das características superficiais dos CPs fabricados.

#### 4.3.1 Avaliação e comparação dos aspectos de fabricação dos CPs

Neste tópico será discutido e comparado os aspectos da fabricação dos CPs por MA e MS. Essa discussão será focada nos parâmetros de tempo e matéria prima utilizada para fabricação, além de possíveis aspectos de automatização do processo que podem ser utilizados.

O tempo ativo de fabricação por MS é inferior aos necessários na MA, reduzido em até 99 % do tempo, de 1600 a aproximadamente 12 s., considerando os CPs padrões da MA e

MS, respectivamente. Esse tempo de usinagem foi considerado para peças com diâmetro inicial próximo do desejado, caso seja necessário utilizar um CP com diâmetro maior, será necessário a aplicação de múltiplos passos de usinagem. Todavia, mesmo com a utilização de diversos passos, o tempo ativo da MS e MA continuaram distintos.

Essa diferença nos tempos de usinagem está limitada ao tempo ativo, uma vez que é exigido um tempo passivo semelhante na preparação antes e após manufatura das duas metodologias, sendo utilizado aproximadamente 270 s. e 510 s. para preparação antes da MA e MS, respectivamente, enquanto ambas as metodologias necessitam de aproximadamente 60 segundos para preparação após manufatura. De tal forma, o tempo total de manufatura é de aproximadamente 33 minutos para MA e 10 minutos para MS e, conseqüentemente, uma diferença de aproximadamente 70 % no tempo total necessário entre MS e MA.

Apesar da MA apresentar tempo de fabricação superior, é necessário considerar que, conforme citado na seção 3.1.5 dessa pesquisa, é possível automatizar o processo de fabricação dos CPs e, assim, reduzindo o tempo de preparação anterior e posterior à manufatura. Essa redução consiste na preparação da máquina em apenas uma ocasião, e posterior extração de até quinze corpos de prova de forma simultânea do equipamento, sendo que os tempos de preparação para um único CP são praticamente iguais ao tempo passivo utilizado na fabricação de um ciclo de quinze corpos. Portanto, a comparação dos tempos necessários para MA e MS deve considerar a quantidade de peças necessárias, além dos parâmetros de fabricação escolhidos nos processos.

Além disso, os parâmetros de fabricação podem alterar o tempo ativo de manufatura, como, por exemplo, a espessura de camada (EC) de 0,10 mm gera o aumento de até 52% do tempo de fabricação, enquanto a aplicação de uma EC de 0,30 mm gera a redução de 48% do tempo necessário. Dentre os parâmetros subtrativos, a velocidade de avanço se destaca por sua influência no tempo necessário para corte, aumentando em 125 % na aplicação da menor  $V_a$ , e reduzindo em até 17 % para as maiores velocidades. Todos esses tempos são porcentagens em relação ao CPs padrão, que apresentam tempo ativo de manufatura de 1600 s para MA e 14 s para MS.

Além do tempo de fabricação, a massa perdida no processo também foi considerada, sendo esses valores praticamente nulos para a MA, se limitando 0,010 gramas por preparação da máquina de extrusão. Para MS, o desperdício de material foi maior, entre 0,8 g e 0,24 g por peça fabricada, em que a profundidade de corte foi o único parâmetro que influenciou significativamente a quantidade de cavaco.

Ademais, a aplicação em conjunto da MA e MS promoveu a geração mínima de cavaco em um tempo de fabricação reduzido. Essas reduções são provenientes da possibilidade de fabricação aditiva com dimensões próximas ao necessário, utilizando a MS apenas para impor as características de rugosidade e circularidade típicas da técnica.

Por fim, nesse trabalho foram apresentadas as principais comparações entre as metodologias em função do consumo de tempo e material, porém, o aspecto combinatório das técnicas precisa ser incluído na análise, conforme realizado nessa discussão. Os requisitos de projeto são essenciais para definição dos parâmetros e tipo de metodologias de fabricação, entretanto, por meio dos dados apresentados nessa pesquisa, é possível abordar qual é o melhor parâmetro ou a combinação destes, além de quais aditivos e subtrativos são ideais para redução do tempo e massa utilizada para manufatura.

#### **4.3.2 Avaliação e comparação das características superficiais dos CPs**

Nesse tópico será discutido e comparado os aspectos superficiais dos CPs fabricados por MA e MS. Essa discussão será direcionada à rugosidade, perfilometria, cilindridade e tolerâncias geométricas, além das possíveis decisões de projetos utilizadas para otimizar essas características.

A rugosidade encontrada nesse trabalho está condizente com os trabalhos publicados por Tomal *et al.* (2018), Oliveira (2020), Ferreira *et al.* (2020), Corral *et al.* (2021) e Guo *et al.* (2021). Os melhores resultados de rugosidade, Ra, foram obtidos para os CPs com menor avanço, apresentando uma redução entre MA para MS de 90,81% para o PLA com fibra de carbono torneados, enquanto outros autores, como Oliveira (2020) alcançaram redução de 89,59 % no torneamento de PLA, Ferreira *et al.*, (2020) obteve redução de 95,57 % no torneamento de PA 12 e Tomal *et al.* (2018) conseguiu 91,30 % de redução no fresamento de PLA. Todos esses resultados indicam a redução da rugosidade dos polímeros e seus compósitos em função da aplicação de usinagem, sendo que essa otimização pode ser mais eficiente ao se considerar os parâmetros aditivos na escolha das estratégias de subtração.

Conforme apresentado na seção 4.2.3, a melhor e pior rugosidade, Ra e Rq, foram obtidas para os CPs com a menor e maior velocidade de avanço, respectivamente. De tal forma, foi confirmado a importância desse parâmetro nas características superficiais do CP, conforme apresentado na literatura. Todavia, em divergência ao apresentado na literatura, foi encontrado um comportamento inesperado na evolução da profundidade de corte, em que esse evento possibilitou uma redução da rugosidade em 90,21%. Essa diminuição está diretamente

correlacionada com as características de impressão do CP, em que foram escolhidas as ap em função da espessura de deposição, conforme apresentado na Figura 4.12.

Além disso, constata-se que a rugosidade Ra, Rq e Rt alcançada pela ap de 0,6 mm e 0,2 mm, extremos superior e inferior, respectivamente, foram estatisticamente equivalentes, indicando que, tanto a retirada excessiva de material quanto o mínimo possível, podem gerar redução da rugosidade. Em outros termos, a aplicação da profundidade de corte de 0,6 mm apresenta macro geometrias e micro geometrias estreitas, porém, gera maior desperdício de material, apresentando três vezes a quantidade de cavaco gerado na profundidade de corte mínima. Por outro lado, a aplicação da remoção mínima de material pode gerar problemas nos aspectos macrogeométricos do CP, em especial a cilindridade, conforme apresentado na

Figura 4.9.

Os problemas de cilindridade encontrados na ap de 0,2 mm são consequência dos defeitos de cilindridade da metodologia aditiva, conforme apresentado na Figura 4.4. Os desvios de cilindridade da MA próximos a 220  $\mu\text{m}$ , valor esse superior a profundidade de corte mínima aplicada e, conseqüentemente, resultando em diversas regiões em que não foi possível retirar material.

Desse modo, uma possível solução para a otimização da rugosidade, aliada a redução do desperdício, é a usinagem com ap igual a 0,2 mm, ou 50 % da espessura de deposição, de componentes fabricados por MA com cilindridade otimizada. Uma possível solução seria a diminuição da espessura de camada, parâmetro influente na cilindridade dos CP, conforme apresentado na Figura 4.4. Todavia, essa escolha deve ser realizada considerando o tempo de fabricação da MA, sobretudo, considerando que a diminuição da espessura de camada de 0,15 mm para 0,10 mm aumentou em 52 % o tempo ativo de fabricação do CP.

Ademais, a distribuição estatística dos pontos, assimetria e curtose, modificaram de forma expressiva após aplicação da MS. Tanto os valores bidimensionais, Rsk e Rku, quanto os tridimensionais, Ssk e Sku, se aproximaram dos seus valores simétricos de assimetria igual a 0 e curtose à 3. Entre os parâmetros subtrativos, a ap apresentou os melhores resultados, sendo observado comportamento semelhante à rugosidade, ou seja, a profundidade de 0,2 mm e 0,6 mm obtiveram os melhores resultados.

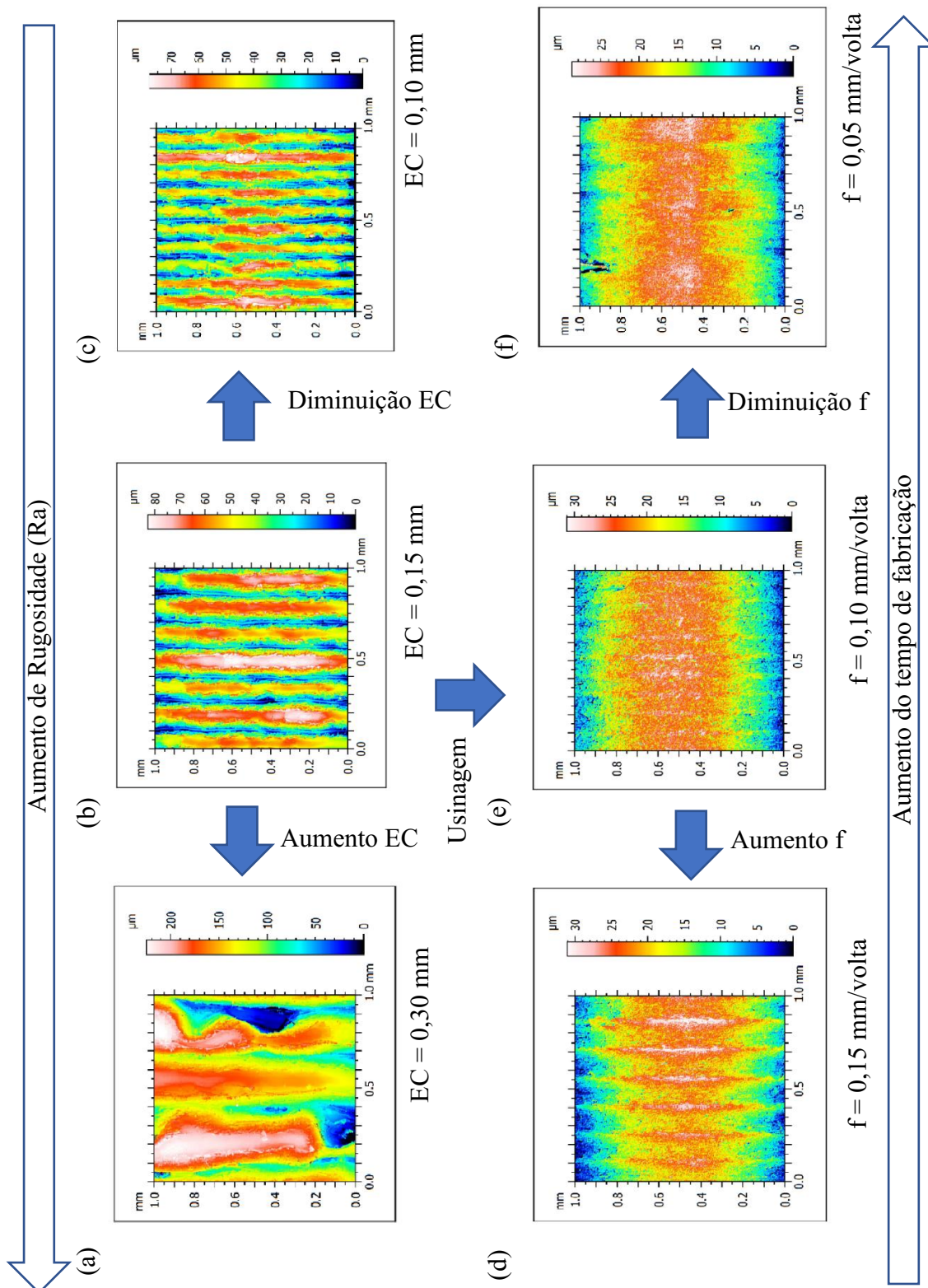
Além disso, foi encontrado uma evolução das distribuições estatísticas, assimetria e curtose, em função da modificação exclusiva dos parâmetros aditivos, em especial a espessura de camada, sendo que, a menor espessura de camada apresentou características bidimensionais estatisticamente equivalentes ao melhor desempenho da MS, a profundidade de corte.

Por fim, é apresentado na Figura 4.17 uma comparação entre a evolução das modificações superficiais em função dos parâmetros aditivos e subtrativos, sendo representados seis imagens de perfilometria, constituído de um CP na Figura 4.17 (b), fabricado por MA utilizando as configurações padrões; na Figura 4.17 (a), CP fabricado com EC igual a 0,30 mm; na Figura 4.17 (c), CP fabricado com EC igual a 0,10 mm; Figura 4.17 (e), CP fabricado considerando as configurações padrões da MA e MS; Figura 4.17 (d), CP fabricado com Va igual a 0,15 m/min; e Figura 4.17 (e), CP fabricado com Va igual a 0,10 m/min.

Conforme apresentado na Figura 4.17 e o abordado no tópico 4.3.1, a velocidade de avanço e espessura de camada reduziram as características superficiais em troca do maior tempo de fabricação, e essa permutação não ocorre para ap, porém existem limitações quanto a otimização aos desvios de formas, em principal a cilindridade. Em função disso, a seleção de cada parâmetro deve ser realizada considerando os recursos disponíveis, como por exemplo, um projeto de um componente com baixa rugosidade pode ser realizado por meio da redução da espessura de camada ou aplicação da MS após fabricação aditiva, sendo essa decisão realizada considerando as exigências superficiais e tempo disponível.

Ilustrando o problema citado, caso um componente precise ser fabricado com rugosidade Ra, inferior a 20  $\mu\text{m}$ , a estratégia de fabricação pode ser a MA com espessura de camada de 0,10 mm, ou MA com espessura de camada de 0,15 mm e posterior usinagem com avanço de 0,10 mm/volta. Ambas as estratégias geram o resultado necessário, porém a primeira exige um tempo útil de fabricação superior, de aproximadamente 45 min. Enquanto isso, a segunda exige um novo maquinário, porém a fabricação do componente em 42 min, sendo 32 min da MA e 10 min da MS, além de apresentar valores de rugosidade e cilindridades inferiores.

Figura 4.17 Comparativo dos aspectos superficial tridimensional, superficial bidimensional e tempo necessário para fabricação dos corpos de prova em função da alteração da espessura de camada (EC) e avanço (f).





## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSÕES

Esse trabalho foi realizado com o objetivo geral da avaliação dos efeitos dos parâmetros de processamento da manufatura aditiva em conjunto da manufatura subtrativa de compósitos poliméricos no contexto híbrido. Para aplicação de extrusão de material e o torneamento cilíndrico externo de PLA com fibra de carbono fragmentado, é possível afirmar que:

- A aplicação de manufatura subtrativa reduziu as tolerâncias dimensionais, sendo alcançado tolerâncias IT4 para todas as peças usinadas, enquanto as peças extrudadas obtiveram IT10 em todas as alterações dos parâmetros, com exceção dos corpos fabricados com temperatura de extrusão 240 °C, que alcançaram IT9.
- Os desvios macrogeométricos reduziram após aplicação da manufatura subtrativa, sendo alcançado  $18,80 \pm 2,03 \mu\text{m}$  para a cilindricidade (CLYt), representando redução de 91 % em comparação aos resultados obtidos após extrusão, respectivamente.
- A rugosidade foi reduzida após aplicação da manufatura subtrativa, sendo a utilização avanço de 0,05 mm/volta responsável pela melhor rugosidade Ra, igual a  $2,47 \pm 0,03 \mu\text{m}$ , representando redução de 90,81 % em comparação ao inicial obtido após extrusão.
- A força de corte apresentou proporcionalidade direta ao avanço e profundidade de corte, porém, nenhuma alteração a em relação à velocidade de corte.

Em relação às vantagens e limitações da manufatura aditiva e manufatura subtrativa, em conjunto da sua aplicação em um contexto híbrido, é possível afirmar que:

- A fabricação por manufatura aditiva permite o processamento sequencial de diversas peças (limitado a 15 por ciclo nessa pesquisa), possibilitando redução do tempo passivo e facilitando o processamento dos corpos, porém com elevado tempo de fabricação ativo. Enquanto a manufatura subtrativa apresenta o tempo de fabricação ativo inferior, entretanto, de difícil automatização e tempo passivo superior a manufatura aditiva.
- A redução espessura de camada apresentou desvios microgeométricos mais estreitos, todavia, também foi responsável pelo aumento do tempo ativo de

fabricação. Enquanto isso, a evolução do avanço na manufatura subtrativa gerou um comportamento semelhante, porém, devido ao baixo tempo de fabricação ativo desse tipo de processamento, a redução não apresentou grandes limitações.

Finalmente, em relação à análise da cadeia de processamento da manufatura aditiva e manufatura subtrativa em um contexto híbrido, as seguintes conclusões podem ser realizadas:

- A redução das tolerâncias geométricas por meio da manufatura subtrativa e manufatura aditiva apresentou resultados superiores e menor tempo de processamento que a extrusão com espessura de camada reduzida, sendo esse o parâmetro aditivo mais influente na redução das características superficiais.
- A aplicação de ap de 50% e 150% da espessura de deposição, e consequente corte no centro do filamento, foi responsável pelos melhores resultados de rugosidade na avaliação desse parâmetro.
- O elevado desvio de cilindridade das peças extrudadas por manufatura aditiva afetaram a capacidade de cisalhamento na aplicação de ap reduzidos, sendo observado regiões da superfície ensaiada que não sofreram remoção de material.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestão para trabalhos futuros, cujo objetivo sejam aprofundar e complementar o estudo realizado nesse trabalho, tem-se:

- Modificação de espessura de camada objetivando redução dos desvios de cilíndricidade e, conseqüentemente, habilitando remoção completa de material à baixas profundidade de corte.
- Avaliação quantitativa da evolução da temperatura de extrusão ao longo do processamento aditivo de peças sequenciais, objetivando redução do tempo de resfriamento nessa pesquisa;
- Avaliação da capacidade de automatização do processo subtrativo, objetivando redução do tempo passivo de manufatura;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos corpos de prova antes e depois da aplicação de usinagem do PLA com fibra de carbono;

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAMIR, M.; TOLOUEI-RAD, M.; GIASIN, K.; NOSRATI, A. Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 105, no. 5–6, p. 2289–2308, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04348-z>.

ADAM, G.; GIBBS, J. H. On the temperature dependence of cooperative relaxation properties in glass-forming liquids. **The Journal of Chemical Physics**, vol. 43, no. 1, p. 139–146, 1965. <https://doi.org/10.1063/1.1696442>.

AHMADIFAR, M.; BENFRIHA, K.; SHIRINBAYAN, M.; TCHARKHTCHI, A. Additive Manufacturing of Polymer-Based Composites Using Fused Filament Fabrication (FFF). **Springer Netherlands**, 2021. vol. 28, . DOI 10.1007/s10443-021-09933-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09933-8> ..

AHN, D.; KWEON, J. H.; CHOI, J.; LEE, S. Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 212, no. 2, p. 339–346, 2012. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2011.08.013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.08.013>.

AKHOUNDI, B.; NABIPOUR, M.; KORDI, O.; HAJAMI, F. Calculating printing speed in order to correctly print PLA/continuous glass fiber composites via fused filament fabrication 3D printer. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, vol. 36, no. 1, p. 162–181, 2023. <https://doi.org/10.1177/0892705721997534> .

AKULA, S.; KARUNAKARAN, K. P. Hybrid adaptive layer manufacturing: An Intelligent art of direct metal rapid tooling process. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 22, no. 2, p. 113–123, 2006. <https://doi.org/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 Tech.**, vol. 54, no. 1–4, p. 40–46, 1995. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01917-0](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01917-0)

ALTIN KARATAŞ, M.; GÖKKAYA, H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. **Defence Technology**, vol. 14, no. 4, p. 318–326, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>.

AMANULLAH, A. N. M.; MURSHIDUZZAMAN; SALEH, T.; KHAN, R. Design and Development of a Hybrid Machine Combining Rapid Prototyping and CNC Milling Operation. **Procedia Engineering**, vol. 184, p. 163–170, 2017. DOI 10.1016/j.proeng.2017.04.081. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.081>.

ARIF, Z.; KHALID, M. Y.; SHEIKH, M. F.; ZOLFAGHARIAN, A.; BODAGHI, M. Biopolymeric sustainable materials and their emerging applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, vol. 10, no. 4, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108159> .

ARMILLOTTA, A. Direct texturing for additive manufacturing: software support and build tests. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 26, no. 5, p. 881–894, 2020. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2019-0070>.

ARUN R., R.; THYLA, P. R.; MAHENDRA K., N.; ARAVIND, S. Optimization of machining parameters of composites using multi-attribute decision-making techniques: A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, vol. 37, no. 2, p. 77–89, 2018. <https://doi.org/10.1177/0731684417732840>.

BARRY, J.; BYRNE, G. The mechanisms of chip formation in machining hardened steels. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, vol. 124, no. 3, p. 528–535, 2002. <https://doi.org/10.1115/1.1455643>.

BEHZADNASAB, M.; YOUSEFI, Ali A.; EBRAHIMIBAGHA, D.; NASIRI, Farahnaz. Effects of processing conditions on mechanical properties of PLA printed parts. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 26, no. 2, p. 381–389, 2020. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2019-0048>.

BHARGAV, A.; SANJAIRAJ, V.; ROSA, V.; FENG, L. W.; FUH YH, J. Applications of additive manufacturing in dentistry: A review. **Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials**, vol. 106, no. 5, p. 2058–2064, 2018. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33961>.

BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 83, no. 1–4, p. 389–405, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>.

BIROSZ, M. T.; ANDÓ, M. Simplified local infill size optimization for FDM printed PLA parts. **Scientific reports**, vol. 13, no. 1, p. 5933, 2023. DOI 10.1038/s41598-023-33181-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33181-4>.

BRANCEWICZ-STEINMETZ, E.; SAWICKI, J.. Bonding and Strengthening the PLA Biopolymer in Multi-Material Additive Manufacturing. **Materials**, vol. 15, no. 16, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15165563>.

BREAZ, R. E.; RACZ, S. G.; GIRJOB, C. E.; TERA, M.; BIRIS, C. Using open source software CNC controllers and modular multi-axis mechanical structure as integrated teaching environment for CAD/CAM/CAE training. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol. 968, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/968/1/012024>.

BOURELL, D.; KRUTH, J. P.; LEU, M.; LEVY, G.; ROSEN, D.; BEESE, A. M.; CLARE, A. Materials for additive manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 66, no. 2, p. 659–681, 2017. DOI 10.1016/j.cirp.2017.05.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>.

BUCKLEY, C. P. **Introduction to physical polymer science**. [S. l.: s. n.], 1993. vol. 53, . [https://doi.org/10.1016/0923-0467\(93\)85007-i](https://doi.org/10.1016/0923-0467(93)85007-i).

BUJ-CORRAL, I.; BAGHERI, A.; SIVATTE-ADROER, M. Effect of printing parameters on dimensional error, surface roughness and porosity of FFF printed parts with grid structure. **Polymers**, vol. 13, no. 8, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13081213> .

BUSTILLOS, J.; MONTERO, D.; NAUTIYAL, P.; LOGANATHAN, A.; BOESL, B.; AGARWAL, A. Integration of graphene in poly(lactic) acid by 3D printing to develop creep and wear-resistant hierarchical nanocomposites. **Polymer Composites**, vol. 39, no. 11, p. 3877–3888, 2018. <https://doi.org/10.1002/pc.24422> .

BUTE, I.; T., S.; VIDINEJEVS, S.; VEVERE, L.; SEVCENKO, J.; ANISKEVICH, A. Thermal properties of 3D printed products from the most common polymers. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 124, no. 7–8, p. 2739–2753, 2023. DOI 10.1007/s00170-022-10657-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10657-7> .

CAFASSO, D.; CALABRESE, C.; CASELLA, G.; BOTTANI, E.; MURINO, T. Framework for selecting manufacturing simulation software in industry 4.0 environment. **Sustainability (Switzerland)**, vol. 12, no. 15, p. 1–34, 2020. <https://doi.org/10.3390/SU12155909>.

CAGGIANO, A. Machining of fibre reinforced plastic composite materials. **Materials**, vol. 11, no. 3, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11030442>.

CALLISTER. **Materials Science and Engineering - Callister**. [S. l.: s. n.], 1991. vol. 26, . <https://doi.org/10.1007/BF01184995>.

CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, R. Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials and Design**, vol. 83, p. 768–776, 2015. DOI 10.1016/j.matdes.2015.06.053. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.053>.

CASTILLO, F. Y.; SOCHER, R.; KRAUSE, B.; HEADRICK, R.; GRADY, B. P.; PRADA-SILVY, R.; PÖTSCHKE, P. Electrical, mechanical, and glass transition behavior of polycarbonate-based nanocomposites with different multi-walled carbon nanotubes. **Polymer**, vol. 52, no. 17, p. 3835–3845, 2011. DOI 10.1016/j.polymer.2011.06.018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2011.06.018>.

ÇEVIK, Ü.; KAM, M. A Review Study on Mechanical Properties of Obtained Products by FDM Method and Metal/Polymer Composite Filament Production. **Journal of Nanomaterials**, vol. 2020, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6187149> .

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: Journal of the International Measurement Confederation**, vol. 95, p. 99–115, 2017. DOI 10.1016/j.measurement.2016.09.043. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.09.043>.

CHACÓN, J. M.; CAMINERO, M. A.; GARCÍA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, 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**, vol. 124, p. 143–157, 2017. DOI 10.1016/j.matdes.2017.03.065. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.

CHANDGUDE, S.; SALUNKHE, S. In state of art: Mechanical behavior of natural fiber-based hybrid polymeric composites for application of automobile components. **Polymer Composites**, vol. 42, no. 6, p. 2678–2703, 2021. <https://doi.org/10.1002/pc.26045>.

CHANDGUDE, S.; SALUNKHE, S. In state of art: Mechanical behavior of natural fiber-based hybrid polymeric composites for application of automobile components. **Polymer Composites**, vol. 42, no. 6, p. 2678–2703, 2021. <https://doi.org/10.1002/pc.26045> .

CHE, D.; SAXENA, I.; HAN, P.; GUO, P.; EHMANN, K. F. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: A literature review. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, vol. 136, no. 3, 2014. <https://doi.org/10.1115/1.4026526>.

CHEN, L.; LAU, T. Y.; TANG, K. Manufacturability analysis and process planning for additive and subtractive hybrid manufacturing of Quasi-rotational parts with columnar features. **CAD Computer Aided Design**, vol. 118, p. 102759, 2020. DOI 10.1016/j.cad.2019.102759. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.102759> .

CHEN, Y.; WANG, J.; AN, Q. Mechanisms and predictive force models for machining with rake face textured cutting tools under orthogonal cutting conditions. **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 195, no. December 2020, p. 106246, 2021. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2020.106246. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106246> .

CHEN, Y.; WANG, J.; AN, Q. Mechanisms and predictive force models for machining with rake face textured cutting tools under orthogonal cutting conditions. **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 195, no. December 2020, p. 106246, 2021. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2020.106246. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106246>.

CHENG, X.; HUANG, Y.; FANG, Q.; GAO, J.; LUO, T.; ZHOU, Ying; YANG, C. Effect of the double bond content of sizing agents on the mechanical properties of carbon fibre reinforced vinyl ester composites. **Composites Science and Technology**, vol. 218, no. November 2021, p. 109145, 2022. DOI 10.1016/j.compscitech.2021.109145. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109145> .

CHOI, D. S.; LEE, S. H.; SHIN, B. S.; WHANG, K. H.; SONG, Y. A.; PARK, S. H.; JEE, H. S. Development of a direct metal freeform fabrication technique using CO2 laser welding and milling technology. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 113, no. 1–3, p. 273–279, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00652-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00652-5).

CHONG, L.; RAMAKRISHNA, S.; SINGH, S. A review of digital manufacturing-based hybrid additive manufacturing processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 95, no. 5–8, p. 2281–2300, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1345-3>.

CHONG, Li; RAMAKRISHNA, Seeram; SINGH, Sunpreet. A review of digital manufacturing-based hybrid additive manufacturing processes. **International Journal of**

**Advanced Manufacturing Technology**, vol. 95, no. 5–8, p. 2281–2300, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1345-3> .

CUAN-URQUIZO, E.; ÁLVAREZ-TREJO, A.; ROBLES GIL, A.; TEJADA-ORTIGOZA, Viridiana; CAMPOSECO-NEGRETE, Carmita; URIBE-LAM, Esmeralda; TREVIÑO-QUINTANILLA, Cecilia D. Effective Stiffness of Fused Deposition Modeling Infill Lattice Patterns Made of PLA-Wood Material. **Polymers**, vol. 14, no. 2, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14020337> .

DALNOKI-VERESS, K.; FORREST, J. A.; MURRAY, C.; GIGAULT, C.; DUTCHER, J. R. Molecular weight dependence of reductions in the glass transition temperature of thin, freely standing polymer films. **Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics**, vol. 63, no. 3, p. 1–10, 2001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.63.031801> .

DAI, J.; XU, W.; OUYANG, F. Precision Analysis of Noncircular Gears Based on CNC Machining Technology under Cloud Computing Platform. **Shock and Vibration**, vol. 2022, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1359084> .

DANDEKAR, C. R.; SHIN, Y. C. Modeling of machining of composite materials: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 57, p. 102–121, 2012. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006> .

DE JAGER, P. J.; BROEK, J. J.; VERGEEST, J. S. M. A comparison between zero and first order approximation algorithms for layered manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 3, no. 4, p. 144–149, 1997. <https://doi.org/10.1108/13552549710191854> .

DEJA, M.; SIEMIATKOWSKI, M. S.; ZIELINSKI, D. Multi-criteria comparative analysis of the use of subtractive and additive technologies in the manufacturing of offshore machinery components. **Polish Maritime Research**, vol. 27, no. 3, p. 71–81, 2020. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0048> .

DENKENA, B.; KRÖDEL, A.; ELLERSIEK, L. Influence of metal working fluid on chip formation and mechanical loads in orthogonal cutting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 118, no. 9–10, p. 3005–3013, 2022. DOI 10.1007/s00170-021-08164-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08164-2> .

DENKENA, B.; KRÖDEL, A.; ELLERSIEK, L. Influence of metal working fluid on chip formation and mechanical loads in orthogonal cutting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 118, no. 9–10, p. 3005–3013, 2022. DOI 10.1007/s00170-021-08164-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08164-2> .

DOLLAR, A. M.; HOWE, R. D. A robust compliant grasper via shape deposition manufacturing. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, vol. 11, no. 2, p. 154–161, 2006. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2006.871090> .

DOMÍNGUEZ-ROBLES, J.; MARTIN, N. K.; FONG, M. L.; STEWART, Sarah A.; IRWIN, Nicola J.; RIAL-HERMIDA, María Isabel; DONNELLY, Ryan F.; LARRAÑETA, Eneko. Antioxidant pla composites containing lignin for 3D printing applications: A potential material



for healthcare applications. **Pharmaceutics**, vol. 11, no. 4, p. 5–7, 2019. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11040165> .

DOU, H.; CHENG, Y.; YE, W.; ZHANG, D.; LI, J.; MIAO, Z.; RUDYKH, S. Effect of process parameters on tensile mechanical properties of 3D printing continuous carbon fiber-reinforced PLA composites. **Materials**, vol. 13, no. 17, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13173850> .

DOUGLAS, S. D.; STOOPS, W. N. Polymer Distribution in Vinyl Ester Resins. **Industrial & Engineering Chemistry**, vol. 28, no. 10, p. 1152-1155, 1936. [DOI: 10.1021/ie50322a006](https://doi.org/10.1021/ie50322a006).

DU, J.; ZHANG, H.; GENG, Y.; MING, W.; HE, W.; MA, J.; CAO, Y.; LI, X.; LIU, K. A review on machining of carbon fiber reinforced ceramic matrix composites. **Ceramics International**, vol. 45, no. 15, p. 18155–18166, 2019. DOI 10.1016/j.ceramint.2019.06.112. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.112>.

DU, J.; ZHANG, H.; GENG, Y.; MING, W.; HE, W.; MA, J.; CAO, Y.; LI, X.; LIU, Kun. A review on machining of carbon fiber reinforced ceramic matrix composites. **Ceramics International**, vol. 45, no. 15, p. 18155–18166, 2019. DOI 10.1016/j.ceramint.2019.06.112. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.112> .

DU, W.; BAI, Q.; ZHANG, B. Machining characteristics of 18Ni-300 steel in additive/subtractive hybrid manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 95, no. 5–8, p. 2509–2519, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1364-0>.

ELKHOLY, A.; ROUBY, M.; KEMPERS, R.. Characterization of the anisotropic thermal conductivity of additively manufactured components by fused filament fabrication. **Progress in Additive Manufacturing**, vol. 4, no. 4, p. 497–515, 2019. DOI 10.1007/s40964-019-00098-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00098-2> .

EILIAT, H.; URBANIC, J. Determining the relationships between the build orientation, process parameters and voids in additive manufacturing material extrusion processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 100, no. 1–4, p. 683–705, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2540-6>.

EMMANUEL S.; SCOTT A. H., J. H. B. Mathematical Methods of Investigation Mathematical Modeling of the Deformation Properties of Nonwoven. **Technology**, vol. 38, no. 2, p. 64–67, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10692-006-0063-7>

ERENKOV, O. Y.; KALITA, E. G.; MAZIN, R. S. Turning of polymer materials using billet pretreatment. **Chemical and Petroleum Engineering**, vol. 47, no. 7–8, p. 500–504, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10556-011-9500-4>.

ERUKHIMOVICH, I.; DE LA CRUZ, M. O. Phase equilibria and charge fractionation in polydisperse polyelectrolyte solutions. , p. 1337–1347, 2004. DOI 10.1002/polb. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0406218%0Ahttp://dx.doi.org/10.1002/polb>.

EYERS, D. R.; POTTER, A. T. Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective. **Computers in Industry**, vol. 92–93, p. 208–218, 2017. <https://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**, vol. 107, p. 367–392, 2016. DOI 10.1016/j.addr.2016.06.012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.

FELDHAUSEN, T.; HEINRICH, L.; SALEEBY, K.; BURL, A.; POST, B.; MACDONALD, E.; SALDANA, C.; LOVE, L. Review of Computer-Aided Manufacturing (CAM) strategies for hybrid directed energy deposition. **Additive Manufacturing**, vol. 56, no. May, p. 102900, 2022. DOI 10.1016/j.addma.2022.102900. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102900>.

FERREIRA, I.; MADUREIRA, R.; VILLA, S.; MACHADO, M.; LINO, J.; JESUS, De. Machinability of PA12 and short fibre – reinforced PA12 materials produced by fused filament fabrication. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04839-z>.

FLORY, P. Tensile strength in relation to molecular weight of high polymers. **Journal of the American Chemical Society**, vol. 67, no. 1, p. 2048–2050, 1945 <https://doi.org/10.1021/ja01227a506>.

FLYNN, J. M.; SHOKRANI, A.; NEWMAN, S. T.; DHOKIA, V. Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 101, p. 79–101, 2016. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007>.

FRANK, C. R.; SAMUEL, J. Scalable production of polymer nanofiber-based ropes, cables, and coatings. **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 133, no. 33, p. 1–8, 2016. <https://doi.org/10.1002/app.43747>.

GAJDOŠ, I.; SLOTA, J. influence of printing conditions on structure in FDM prototypes. **Technical Gazette**, vol. 20, no. 2, p. 231–236, 2013. <https://doi.org/658.512.2:004.896>.

GAO, H.; KONSTANTINOV, I. A.; ARTURO, S. G.; BROADBELT, L. J. On the modeling of number and weight average molecular weight of polymers. **Chemical Engineering Journal**, vol. 327, p. 906–913, 2017. DOI 10.1016/j.cej.2017.06.131. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.131>.

GESCHKE, D. **Physical Properties of Polymers Handbook**. [S. l.: s. n.], 1997. vol. 199, . [https://doi.org/10.1524/zpch.1997.199.part\\_1.128](https://doi.org/10.1524/zpch.1997.199.part_1.128).

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made - Supplementary Information. **Science Advances**, vol. 3, no. 7, p. 19–24, 2017.

GEORGE, A.; SANJAY, M. R.; SRISUK, R.; PARAMESWARANPILLAI, Jyotishkumar; SIENGCHIN, Suchart. A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 154, p. 329–338, 2020. DOI 10.1016/j.ijbiomac.2020.03.120. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.120>.

GILL, L.; DAMRON, J.; WACHOWICZ, M.; WHITE, J. L. Glass transitions, segmental dynamics, and friction coefficients for individual polymers in multicomponent polymer systems by chain-level experiments. **Macromolecules**, vol. 43, no. 8, p. 3903–3910, 2010. <https://doi.org/10.1021/ma100477p>.

GINJUPALLI, K.; SHAVI, G. V.; AVERINENI, R. K.; BHAT, M.; UDUPA, N.; NAGARAJA UPADHYA, P. Poly( $\alpha$ -hydroxy acid) based polymers: A review on material and degradation aspects. **Polymer Degradation and Stability**, vol. 144, p. 520–535, 2017. DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2017.08.024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.08.024>.

GNANASEKARAN, K.; HEIJMANS, T.; VAN BENNEKOM, S.; 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**, vol. 9, p. 21–28, 2017. DOI 10.1016/j.apmt.2017.04.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apmt.2017.04.003>.

GOKULDOSS, P. K.; KOLLA, S.; ECKERT, J. Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines. **Materials**, vol. 10, no. 6, 2017. <https://doi.org/10.3390/ma10060672>.

GUESSASMA, S.; BELHABIB, S.; NOURI, H.; BEN HASSANA, O. Anisotropic damage inferred to 3D printed polymers using fused deposition modelling and subject to severe compression. **European Polymer Journal**, vol. 85, p. 324–340, 2016. DOI 10.1016/j.eurpolymj.2016.10.030. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.10.030>.

GUO, C.; LIU, X.; LIU, G. Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. **Polymers**, vol. 13, no. 13, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13132175>.

GUO, C.; LIU, X.; LIU, G. Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. **Polymers**, vol. 13, no. 13, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13132175>.

GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. **Frontiers of Mechanical Engineering**, vol. 8, no. 3, p. 215–243, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>.

GUO, R.; REN, Z.; BI, H.; XU, M.; CAI, L. Electrical and thermal conductivity of polylactic Acid (PLA)-based biocomposites by incorporation of nano-graphite fabricated with fused deposition modeling. **Polymers**, vol. 11, no. 3, 2019. <https://doi.org/10.3390/polym11030549>.

HARABIN, G. P.; BEHANDISH, M. Hybrid Manufacturing Process Planning for Arbitrary Part and Tool Shapes. **CAD Computer Aided Design**, vol. 151, p. 103299, 2022. DOI 10.1016/j.cad.2022.103299. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103299>.

HE, Y.; WEI, J.; HE, Y.; RONG, X.; GUO, W.; WANG, F.; WANG, Y.; LIU, J. A process strategy planning of additive-subtractive hybrid manufacturing based multi-dimensional

manufacturability evaluation of geometry feature. **Journal of Manufacturing Systems**, vol. 67, no. November 2022, p. 296–314, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.003> .

HEIDARI-RARANI, M.; RAFIEE-AFARANI, M.; ZAHEDI, A. M. Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. **Composites Part B: Engineering**, vol. 175, no. July, p. 107147, 2019. DOI 10.1016/j.compositesb.2019.107147. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107147> .

HODONOU, C.; BALAZINSKI, M.; BROCHU, M.; MASCLE, C. Material-design-process selection methodology for aircraft structural components: application to additive vs subtractive manufacturing processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 103, no. 1–4, p. 1509–1517, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03613-5> .

HONARVAR, F.; VARVANI-FARAHANI, A. A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. **Ultrasonics**, vol. 108, no. February, p. 106227, 2020. DOI 10.1016/j.ultras.2020.106227. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106227> .

HONGBIN Z., LEI W., LI S., GUO GUANG N., HUI C., GUO JIE W., HUAI Y., S. Z. Controllable Properties and Microstructure of Hydrogels Based on Crosslinked Poly(ethylene glycol) Diacrylates with Different Molecular Weights. **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 116, no. 5, p. 2658–2667, 2010. <https://doi.org/10.1002/app> .

ISMAIL, S. O.; DHAKAL, H. N.; POPOV, I.; BEAUGRAND, J. Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, vol. 19, no. 4, p. 2043–2052, 2016. DOI 10.1016/j.jestch.2016.07.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.010> .

ISO/ASTM INTERNATIONAL. ISO/ASTM 52900:2021(E), Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. **ASTM International**, vol. i, p. 1–9, 2021. Disponível em: [http://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?ISOASTM52900+15](http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?ISOASTM52900+15) .

IZDEBSKA, J. **Aging and Degradation of Printed Materials**. [S. l.]: Elsevier Inc., 2015. DOI 10.1016/B978-0-323-37468-2.00022-1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-37468-2.00022-1> .

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**, vol. 9, no. 5, p. 552–571, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x> .

JANEESH, G. M.; MEERA, V.; SHALOM, A. M.; RAJAN BABU, D.; NAMBI RAJ, N. A.; SREEKANTH, M. S.; SIVA, V. S.; SUMANGALA, T. P. Enhanced electrical conductivity and structural, mechanical characterization of standalone poly(vinyl alcohol)-graphite nanoplatelets composite films. **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 138, no. 10, p. 1–12, 2021. <https://doi.org/10.1002/app.49976> .

JANEESH, G. M.; MEERA, V.; SHALOM, A. M.; RAJAN BABU, D.; NAMBI RAJ, N. Arunai; SREEKANTH, M. S.; SIVA, V. Samba; SUMANGALA, T. P. Enhanced electrical conductivity and structural, mechanical characterization of standalone poly(vinyl alcohol)-graphite nanoplatelets composite films. **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 138, no. 10, p. 1–12, 2021. <https://doi.org/10.1002/app.49976>.

JASMEE, S.; OMAR, G.; OTHAMAN, S. S. C.; MASRIPAN, N. A.; A. HAMID, H. Interface thermal resistance and thermal conductivity of polymer composites at different types, shapes, and sizes of fillers: A review. **Polymer Composites**, vol. 42, no. 6, p. 2629–2652, 2021. <https://doi.org/10.1002/pc.26029>.

JENG, J. Y.; LIN, M. C. Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 110, no. 1, p. 98–103, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00850-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00850-5).

JIA, C.; ZHANG, P.; SERAJI, S. M.; XIE, R.; CHEN, L.; LIU, D.; XIONG, Y.; CHEN, H.; FU, Y.; XU, H.; SONG, P. Effects of BN/GO on the recyclable, healable and thermal conductivity properties of ENR/PLA thermoplastic vulcanizates. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 152, no. October 2021, p. 106686, 2022. DOI 10.1016/j.compositesa.2021.106686. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106686>.

JIANG, C.; ZHANG, J.; LIN, S.; JU, S.; JIANG, D. Effects of free organic groups in carbon nanotubes on glass transition temperature of epoxy matrix composites. **Composites Science and Technology**, vol. 118, p. 269–275, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.09.008>.

JONUŠAUSKAS, L.; REKŠTYTĖ, S.; BUIVIDAS, R.; BUTKUS, S.; GADONAS, R.; JUODKAZIS, S.; MALINAUSKAS, M. Hybrid subtractive-additive-welding microfabrication for lab-on-chip applications via single amplified femtosecond laser source. **Optical Engineering**, vol. 56, no. 09, p. 1, 2017. <https://doi.org/10.1117/1.oe.56.9.094108>.

JOZWIK, J.; DZIEDZIC, K.; PASZECZKO, M.; BARSZCZ, M. Comparative assessment of tribological properties of selected polymers and polymer composites. **2019 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2019 - Proceedings**, , p. 638–643, 2019. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869670>.

KANG, H. W.; LEE, S. J.; KO, I. K.; KENGLA, C.; YOO, J. J.; ATALA, A. A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity. **Nature Biotechnology**, vol. 34, no. 3, p. 312–319, 2016. DOI 10.1038/nbt.3413. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nbt.3413>.

KARUNAKARAN, K. P.; SREENATHBABU, A.; PUSHPA, V. Hybrid layered manufacturing: Direct rapid metal tool-making process. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, vol. 218, no. 12, p. 1657–1665, 2004. <https://doi.org/10.1177/095440540421801202>.

KELKAR, A.; KOC, B. Geometric planning and analysis for hybrid re-configurable molding and machining process. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 14, no. 1, p. 23–34, 2008. <https://doi.org/10.1108/13552540810841535>.

KELKAR, A.; NAGI, R.; KOC, B. Geometric algorithms for rapidly reconfigurable mold manufacturing of free-form objects. **CAD Computer Aided Design**, vol. 37, no. 1, p. 1–16, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.03.001>.

KESARWANI, S.; VERMA, R. K.; JAYSWAL, S. C. Evaluation of the cutting force, burr formation, and surface quality during the machining of carbon nanoparticle modified polymer composites for structural applications. **Materials Today Communications**, vol. 34, no. November 2022, p. 105375, 2023. DOI 10.1016/j.mtcomm.2023.105375. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105375>.

KLAUS, A.; BECKER, D.; KLEINER, M. Three-dimensional curved profile extrusion - First results on the influence of gravity. **Advanced Materials Research**, vol. 10, p. 5–12, 2006. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.10.5>.

KILIC, N. T.; CAN, B. N.; KODAL, M.; OZKOC, G. The Potential Use of Epoxy-POSS as a Reactive Hybrid Compatibilizers for PLA/PBAT Blends: “Effect of PBAT Molecular Weight and POSS Type”. **Polymer Engineering and Science**, vol. 60, no. 2, p. 398–413, 2020. <https://doi.org/10.1002/pen.25295>.

KISHAWY, H. A.; HEGAB, H.; DEIAB, I.; ELTAGGAZ, A. Sustainability assessment during machining Ti-6Al-4V with nano-additives-based minimum quantity lubrication. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, vol. 3, no. 3, 2019. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030061>.

KOLOSOV, A. E. Prerequisites for Using Ultrasonic Treatment for Intensifying Production of Polymer Composite Materials. **Chemical and Petroleum Engineering**, vol. 50, no. 1–2, p. 11–17, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9846-5>.

KOZAKIEWICZ-LATAŁA, M.; NARTOWSKI, K. P.; DOMINIK, A.; MALEC, K.; GOŁKOWSKA, A. M.; ZŁOCIŃSKA, A.; RUSIŃSKA, M.; SZYMCZYK-ZIÓŁKOWSKA, P.; ZIÓŁKOWSKI, G.; GÓRNIAK, A.; KAROLEWICZ, B. Binder jetting 3D printing of challenging medicines: From low dose tablets to hydrophobic molecules. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, vol. 170, p. 144–159, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2021.11.001>.

KUKUREKA, S. N.; CHEN, Y. K.; HOOKE, C. J.; LIAO, P. The wear mechanisms of acetal in unlubricated rolling-sliding contact. **Wear**, vol. 185, no. 1–2, p. 1–8, 1995. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)06575-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)06575-6).

LALEGANI D., M.; SERJOUEI, A.; ZOLFAGHARIAN, A.; FOTOUHI, M.; MORADI, M.; ARIFFIN, M.K.A.; BODAGHI, M. A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process. **Advanced Powder Materials**, vol. 1, no. 4, p. 100054, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2022.100054>.

LANGAT, H. K.; MWEMA, F. M.; KERAITA, J. N.; AKINLABI, E. T.; WAMBUA, J. M.; JEN, T. C. Optimization of milling parameters of unmodified calotropis procera fiber-reinforced PLA composite (Ucpfrpc). **Journal of Composites Science**, vol. 5, no. 10, p. 2–11, 2021. <https://doi.org/10.3390/jcs5100261>.

LANZETTA, M.; CUTKOSKY, M. R. Shape deposition manufacturing of biologically inspired hierarchical microstructures. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 57, no. 1, p. 231–234, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.102>.

LANZOTTI, A.; GRASSO, M.; STAIANO, G.; MARTORELLI, M. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in *PLA* with an open-source 3-D printer. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 21, no. 5, p. 604–617, 2015. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0135>.

LAUWERS, B.; KLOCKE, F.; KLINK, A.; TEKKAYA, A. E.; NEUGEBAUER, R.; MCINTOSH, D. Hybrid processes in manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 63, no. 2, p. 561–583, 2014. DOI 10.1016/j.cirp.2014.05.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>.

LI, F.; GAO, Y.; ZHANG, C.; JIN, J.; JI, X.; ZHANG, Y.; ZHANG, X.; JIANG, W.. Design of high impact thermal plastic polymer composites with balanced toughness and rigidity: Effect of matrix polymer molecular weight. **Polymer**, vol. 208, no. August, p. 122957, 2020. DOI 10.1016/j.polymer.2020.122957. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122957>.

LI, N.; LI, Y.; LIU, S. Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 238, p. 218–225, 2016. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025>.

LI, X.; LIANG, S.; WANG, W. J.; LI, B. G.; LUO, Y.; ZHU, S. Model-Based Production of Polymer Chains Having Precisely Designed End-to-End Gradient Copolymer Composition and Chain Topology Distributions in Controlled Radical Polymerization, A Review. **Macromolecular Reaction Engineering**, vol. 9, no. 5, p. 409–417, 2015. <https://doi.org/10.1002/mren.201500012>.

LI, Y.; GE, X.; WANG, H.; HU, Y.; NING, F.; CONG, W.; REN, C. Study of material removal mechanisms in grinding of C/SiC composites via single-abrasive scratch tests. **Ceramics International**, vol. 45, no. 4, p. 4729–4738, 2019. DOI 10.1016/j.ceramint.2018.11.165. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.165>.

LIANG, Z.; CHANG, B.; ZHANG, H.; LI, Z.; PENG, G.; DU, D.; CHANG, S.; WANG, L. Electric current evaluation for process monitoring in electron beam directed energy deposition. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 176, no. March, p. 103883, 2022. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2022.103883. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103883>.

LIEM, H.; CHOY, H. S. Superior thermal conductivity of polymer nanocomposites by using graphene and boron nitride as fillers. **Solid State Communications**, vol. 163, p. 41–45, 2013. DOI 10.1016/j.ssc.2013.03.024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssc.2013.03.024>.

LIU, F.; SLATTERY, K.; KINSELLA, M.; NEWKIRK, J.; CHOU, H. N.; LANDERS, R. Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 13, no. 4, p. 236–244, 2007. <https://doi.org/10.1108/13552540710776188>.

LIU, J.; TO, A. C. Topology optimization for hybrid additive-subtractive manufacturing. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, vol. 55, no. 4, p. 1281–1299, 2017. DOI 10.1007/s00158-016-1565-4. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-016-1565-4>.

LIU, W.; DENG, K.; WEI, H.; ZHAO, P.; LI, J.; ZHANG, Y. A decision-making model for comparing the energy demand of additive-subtractive hybrid manufacturing and conventional subtractive manufacturing based on life cycle method. **Journal of Cleaner Production**, vol. 311, no. April, p. 127795, 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.127795. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127795>.

MAZUMDAR, S. K. **Composites Material Engineer and Science**. [S. l.: s. n.], 2002.

MEDELLIN-CASTILLO, H. I.; ZARAGOZA-SIQUEIROS, J. Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review. **Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)**, vol. 32, no. 1, 2019. DOI 10.1186/s10033-019-0368-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0368-0>.

MESSIMER, S. L.; PEREIRA, T. R.; PATTERSON, A. E.; LUBNA, M.; DROZDA, F. O. Full-density fused deposition modeling dimensional error as a function of raster angle and build orientation: Large dataset for eleven materials. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, vol. 3, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.3390/jmmp3010006>.

MILENKOVIC, S.; SLAVKOVIC, V.; FRAGASSA, C.; GRUJOVIC, N.; PALIC, N.; ZIVIC, Fatima. Effect of the raster orientation on strength of the continuous fiber reinforced PVDF/PLA composites, fabricated by hand-layup and fused deposition modeling. **Composite Structures**, vol. 270, no. February, p. 114063, 2021. DOI 10.1016/j.compstruct.2021.114063. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114063>.

MERCHANT, M. E. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. **Journal of Applied Physics**, vol. 16, no. 5, p. 267–275, 1945. <https://doi.org/10.1063/1.1707586>.

MERZ, R.; RAMASWAMI; TERK, K.; WEISS, M. Shape Deposition Manufacturing. **The Solid Freeform Fabrication Symposium**, no. 8426325, p. 1–7, 1994. Disponível em: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/68579>.

MICHAEL F. ASHBY; DAVID R. H. JONES. **Engineering Materials 1 An Introduction to Properties, Applications, and Design**. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080966656000301>.

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**, vol. 102, no. August 2019, p. 103510, 2020. DOI 10.1016/j.jmbbm.2019.103510. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103510>.

MOHAMMADI, M.; LI, Y.; RANDALL, J.; NOFAR, M.; HEUZEY, M. C.; CARREAU, P. J. Effects of molecular weight, stereo configuration of PLA, and processing on the dispersion of multiwalled carbon nanotubes and properties of corresponding nanocomposites. **Canadian**



**Journal of Chemical Engineering**, no. November 2022, p. 1–14, 2023. <https://doi.org/10.1002/cjce.24853>.

MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. **Advances in Manufacturing**, vol. 3, no. 1, p. 42–53, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.

MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L.; NIKZAD, M.; AZADMANJIRI, J. Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment. **Journal of Materials Engineering and Performance**, vol. 25, no. 7, p. 2922–2935, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2157-6>.

MOLNAR, T. G.; BEREZVAI, S.; KISS, A. K.; BACHRATHY, D.; STEPAN, G. Experimental investigation of dynamic chip formation in orthogonal cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 145, no. April, p. 103429, 2019. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2019.103429. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.103429>.

MÜHLEMANN, S.; HJERPPE, J.; HÄMMERLE, C. H.F.; THOMA, D. S. Production time, effectiveness and costs of additive and subtractive computer-aided manufacturing (CAM) of implant prostheses: A systematic review. **Clinical Oral Implants Research**, vol. 32, no. S21, p. 289–302, 2021. <https://doi.org/10.1111/clr.13801>.

NASER, A. Z.; DEIAB, I.; DARRAS, B. M. Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review. **RSC Advances**, vol. 11, no. 28, p. 17151–17196, 2021. <https://doi.org/10.1039/d1ra02390j>.

NBR ISO/ASTM INTERNATIONAL. NBR ISO/ASTM 52900:2018(E), Normas para terminologias da Manufatura aditiva – Princípios Gerais – Terminologia. **ASTM International**, vol. , p. 1–25, 2015. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=TW96TGUXQVNEcHd3QzRpdjN4QkpybVA1YjZqbKZKVUUxQU9TMXc4enpJRT0=>.

NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K. T. Q.; HUI, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, vol. 143, no. February, p. 172–196, 2018. DOI 10.1016/j.compositesb.2018.02.012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

NGUYEN, T. Q.; KAUSCH, H. H. Molecular Weight Distribution and Mechanical Properties. , p. 143–150, 1999. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9231-4\\_32](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9231-4_32).

NI, J.; ZENG, X.; AL-FURJAN, M. S.H.; ZHAO, H.; GUAN, L.; CUI, Z.; HAN, L.. Effect of Drilling Parameters on Machining Performance in Drilling Polytetrafluoroethylene. **Materials**, vol. 15, no. 19, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15196922>.

NOH, Y. J.; KIM, H. S.; KU, B. C.; KHIL, M. S.; KIM, S. Y. Thermal Conductivity of Polymer Composites With Geometric Characteristics of Carbon Allotropes. **Advanced Engineering Materials**, vol. 18, no. 7, p. 1127–1132, 2016. <https://doi.org/10.1002/adem.201500451>.

NURUZZAMAN, D. M.; CHOWDHURY, M. A.; RAHAMAN, M. L. Effect of duration of rubbing and normal load on friction coefficient for polymer and composite materials. **Industrial Lubrication and Tribology**, vol. 63, no. 5, p. 320–326, 2011. <https://doi.org/10.1108/00368791111154931>.

OLIVEIRA, G. B. Manufatura aditiva de PLA extrudado associada à manufatura subtrativa objetivando tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas: uma abordagem híbrida. 2020, 136 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

OKASHA, M. M.; MATIVENGA, P. T.; DRIVER, N.; LI, L. Sequential laser and mechanical micro-drilling of Ni superalloy for aerospace application. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 59, no. 1, p. 199–202, 2010. DOI 10.1016/j.cirp.2010.03.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.011>.

PANCHAGNULA, K. K.; PALANIYANDI, K. Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: A review. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 7, no. 2, p. 180–189, 2018. DOI 10.1016/j.jmrt.2017.06.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.06.003>.

PANCHAGNULA, K. K.; PALANIYANDI, K. Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: A review. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 7, no. 2, p. 180–189, 2018. DOI 10.1016/j.jmrt.2017.06.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.06.003>.

PARANDOUSH, P.; LIN, D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. **Composite Structures**, vol. 182, p. 36–53, 2017. DOI 10.1016/j.compstruct.2017.08.088. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.

PASHNEH-TALA, S.; MOOREHEAD, R.; CLAEYSSSENS, Frederik. Hybrid manufacturing strategies for tissue engineering scaffolds using methacrylate functionalised poly(glycerol sebacate). **Journal of Biomaterials Applications**, vol. 34, no. 8, p. 1114–1130, 2020. <https://doi.org/10.1177/0885328219898385>.

PEREPELKINA, S.; KOVALENKO, P.; PECHENKO, R.; MAKHMUDOVA, K. Investigation of friction coefficient of various polymers used in rapid prototyping technologies with different settings of 3D printing. **Tribology in Industry**, vol. 39, no. 4, p. 519–526, 2017. <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.04.11>.

PATEL, B. I. B.; CHANG, Y.; PARK, S. K.; WANG, S.; ROSHECK, J.; PATEL, K.; WALSH, D.; GUIRONNET, D.; DIAO, Y.. PolyChemPrint: A hardware and software framework for benchtop additive manufacturing of functional polymeric materials. **Journal of Polymer Science**, vol. 59, no. 21, p. 2468–2478, 2021. <https://doi.org/10.1002/pol.20210086>.

PLOTKOWSKI, A.; FERGUSON, J.; STUMP, B.; HALSEY, W.; PAQUIT, V.; JOSLIN, C.; BABU, S. S.; MARQUEZ ROSSY, A.; KIRKA, M. M.; DEHOFF, R. R. A stochastic scan strategy for grain structure control in complex geometries using electron beam powder bed fusion. **Additive Manufacturing**, vol. 46, p. 102092, 2021. DOI 10.1016/j.addma.2021.102092. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102092>.

PINILLA, J. M.; PRINZ, F. B. Lead-time reduction through flexible routing: Application to

Shape Deposition Manufacturing. **International Journal of Production Research**, vol. 41, no. 13, p. 2957–2973, 2003. <https://doi.org/10.1080/0020754021000032040>.

PODROUŽEK, J.; MARCON, M.; NINČEVIĆ, K.; WAN-WENDNER, R. Bio-inspired 3D infill patterns for additive manufacturing and structural applications. **Materials**, vol. 12, no. 3, p. 1–12, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12030499>.

QIAN, Z.; CAO, Z.; GALUSKA, L.; ZHANG, S.; XU, J.; GU, X. Glass Transition Phenomenon for Conjugated Polymers. **Macromolecular Chemistry and Physics**, vol. 220, no. 11, p. 1–30, 2019. <https://doi.org/10.1002/macp.201900062>.

RAJ, S. S. R.; DHAS, J. E. R.; JESUTHANAM, C. P. Challenges on machining characteristics of natural fiber-reinforced composites – A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, vol. 40, no. 1–2, p. 41–69, 2021. <https://doi.org/10.1177/0731684420940773>.

RAJMOHAN, T.; VINAYAGAMOORTHY, R.; MOHAN, K. Review on effect machining parameters on performance of natural fibre–reinforced composites (NFRCS). **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, vol. 32, no. 9, p. 1282–1302, 2019. <https://doi.org/10.1177/0892705718796541>.

RAWAL, S.; SIDPARA, A. M.; PAUL, J. A review on micro machining of polymer composites. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 77, no. March, p. 87–113, 2022. DOI 10.1016/j.jmapro.2022.03.014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.014>.

RAWAL, S.; SIDPARA, A. M.; PAUL, J. A review on micro machining of polymer composites. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 77, no. March, p. 87–113, 2022. DOI 10.1016/j.jmapro.2022.03.014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.014>.

REN, J.; ZHU, Z.; XIA, C.; QU, N.; ZHU, D. Abrasive-assisted Nickel Electroforming Process with Moving Cathode. **Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)**, vol. 30, no. 2, p. 294–300, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0078-4>.

REVILLA-LEÓN, M.; MEYERS, M. J.; ZANDINEJAD, A.; ÖZCAN, M. A review on chemical composition, mechanical properties, and manufacturing work flow of additively manufactured current polymers for interim dental restorations. **Journal of Esthetic and Restorative Dentistry**, vol. 31, no. 1, p. 51–57, 2019. <https://doi.org/10.1111/jerd.12438>.

REVILLA-LEÓN, Marta; MEYERS, Matthew J.; ZANDINEJAD, Amirali; ÖZCAN, Mutlu. A review on chemical composition, mechanical properties, and manufacturing work flow of additively manufactured current polymers for interim dental restorations. **Journal of Esthetic and Restorative Dentistry**, vol. 31, no. 1, p. 51–57, 2019. <https://doi.org/10.1111/jerd.12438>.

ROSSI, A.; LANZETTA, M. Integration of hybrid additive/subtractive manufacturing planning and scheduling by metaheuristics. **Computers and Industrial Engineering**, vol. 144, no. December 2019, p. 106428, 2020. DOI 10.1016/j.cie.2020.106428. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106428>.

SALLES, J. L. C.; GONÇALVES, M. T. T. Effects of Machining Parameters on Surface Quality of the Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE). **Nº**, vol. 8, p. 1–10,

2003. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10119/10119.pdf>.

SALONITIS, K.; D'ALVISE, L.; SCHOINOCHORITIS, B.; CHANTZIS, D. Additive manufacturing and post-processing simulation: laser cladding followed by high speed machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 85, no. 9–12, p. 2401–2411, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7989-y>.

SCAFFARO, R.; DI BARTOLO, A.; DINTCHEVA, N. T. Matrix and filler recycling of carbon and glass fiber-reinforced polymer composites: A review. **Polymers**, vol. 13, no. 21, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13213817>.

SEBASTIEN VAUCHER, VADIM V. YAKOVLEV, H. Y. Materials with Required Dielectric Properties: Computational Development and Production of Polymer-Ceramic Composites S?ebastien. **POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE**, , p. 1–10, 2017. <https://doi.org/10.1002/pen>.

SELEMENEV, M. F.; KRAVCHENKO, I. N.; KUZNETSOV, Yu A.; VELICHKO, S. A.; EROFEEV, M. N.; BOROVNIK, T. N.; PROSOLOV, E. A.; SELEMENEVA, E. M. Software for Simulation of Low-Speed Machining. **Russian Engineering Research**, vol. 41, no. 9, p. 832–835, 2021. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21090240>.

SHAHZAD, K.; DECKERS, J.; ZHANG, Z.; KRUTH, J. P.; VLEUGELS, J. Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering. **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 34, no. 1, p. 81–89, 2014. DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.023>.

SHAMSURI, A. A.; JAMIL, S. N. A. M.; ABDAN, K. A brief review on the influence of ionic liquids on the mechanical, thermal, and chemical properties of biodegradable polymer composites. **Polymers**, vol. 13, no. 16, p. 1–14, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13162597>.

SHCHEKIN, A. V.; TRIBUSHININ, I. N.; FOMIN, V. P. Express Calculation of Machining Costs in CAM Software. **Russian Engineering Research**, vol. 41, no. 7, p. 640–644, 2021. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21070224>.

SHEN, W.; ZHANG, Z.; OKUDAN KREMER, G. E.; QIN, H.. Origami-inspired infill pattern for additive manufacturing. **Manufacturing Letters**, vol. 33, p. 516–520, 2022. DOI 10.1016/j.mfglet.2022.07.066. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.07.066>.

SHEN, W.; WU, W.; LIU, C.; WANG, Y.; ZHANG, X. Thermal conductivity enhancement of PLA/TPU/BN composites by controlling BN distribution and annealing treatment. **Plastics, Rubber and Composites**, vol. 49, no. 5, p. 204–213, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14658011.2020.1729657>.

SILVA, G. C. DA. Acondicionamento E Transporte De Peças Automotivas. 2008.

SINGH, J.; GOYAL, K. K.; KUMAR, R.; GUPTA, V.. Influence of process parameters on mechanical strength, build time, and material consumption of 3D printed polylactic acid parts. **Polymer Composites**, no. June, p. 5908–5928, 2022. <https://doi.org/10.1002/pc.26849> .

SIMAVILLA, D. N.; VENERUS, D. C. Investigation of anisotropic thermal conductivity in

polymers using infrared thermography. **Journal of Heat Transfer**, vol. 136, no. 11, p. 1–9, 2014. <https://doi.org/10.1115/1.4028324>.

ŞIRIN, Ş.; ASLAN, E.; AKINCIOĞLU, G.. Effects of 3D-printed PLA material with different filling densities on coefficient of friction performance. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 29, no. 1, p. 157–165, 2023. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2022-0081>.

SLAMANI, M.; CHATELAIN, J.; HAMEDANIANPOUR, H. Influence of machining parameters on surface quality during high speed edge trimming of carbon fiber reinforced polymers. p. 331–353, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1419-2>.

SONG, Y. A.; PARK, S. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 171, no. 1, p. 35–40, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.062>.

SPINELLI, G.; GUARINI, R.; KOTSILKOVA, R.; IVANOV, E.; ROMANO, V. Experimental, theoretical and simulation studies on the thermal behavior of pla-based nanocomposites reinforced with different carbonaceous fillers. **Nanomaterials**, vol. 11, no. 6, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11061511>.

SPINELLI, G.; GUARINI, R.; KOTSILKOVA, R.; IVANOV, E.; ROMANO, V. Experimental, theoretical and simulation studies on the thermal behavior of pla-based nanocomposites reinforced with different carbonaceous fillers. **Nanomaterials**, vol. 11, no. 6, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11061511>.

SUN, Y. J.; YAN, C.; WU, S. W.; GONG, H.; LEE, C. H. Geometric simulation of 5-axis hybrid additive-subtractive manufacturing based on Tri-dexel model. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 99, no. 9–12, p. 2597–2610, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2577-6>.

SUN, Y. J.; YAN, C.; WU, S. W.; GONG, H.; LEE, C. H. Geometric simulation of 5-axis hybrid additive-subtractive manufacturing based on Tri-dexel model. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 99, no. 9–12, p. 2597–2610, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2577-6>.

SUNGKAPREECHA, C.; FOCKE, W. W.; ANDROSCH, R.. Competition between Liquid-liquid De-mixing, Crystallization, and Glass Transition in Solutions of PLA of Different Stereochemistry and DEET. **Chinese Journal of Polymer Science (English Edition)**, vol. 38, no. 2, p. 174–178, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10118-019-2314-0>.

SURYAKUMAR, S.; KARUNAKARAN, K. P.; BERNARD, A.; CHANDRASEKHAR, U.; RAGHAVENDER, N.; SHARMA, D. Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. **CAD Computer Aided Design**, vol. 43, no. 4, p. 331–344, 2011. DOI 10.1016/j.cad.2011.01.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2011.01.006>.

TAN, L. J.; ZHU, W.; ZHOU, K.. Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing. **Advanced Functional Materials**, vol. 30, no. 43, p. 1–54, 2020. <https://doi.org/10.1002/adfm.202003062>.

TARJUS, G.; KIVELSON, S. A.; NUSSINOV, Z.; VIOT, P. The frustration-based approach

of supercooled liquids and the glass transition: A review and critical assessment. **Journal of Physics Condensed Matter**, vol. 17, no. 50, 2005. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/50/R01>.

TEDLA, G.; JARABEK, A. M.; BYRLEY, P.; BOYES, W.; ROGERS, K.. Human exposure to metals in consumer-focused fused filament fabrication (FFF)/ 3D printing processes. **Science of the Total Environment**, vol. 814, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152622>.

TIAN, X.; LIU, T.; YANG, C.; WANG, Q.; LI, D. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced *PLA* composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 88, p. 198–205, 2016. DOI 10.1016/j.compositesa.2016.05.032. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.032>.

TIPTON, R. B; HOU, D.; SHI, Z.; WELLER, T.s M; BHETHANABOTLA, Venkat R. Optical interconnects on a flexible substrate by multi-material hybrid additive and subtractive manufacturing. **Additive Manufacturing**, vol. 48, no. PA, p. 102409, 2021. DOI 10.1016/j.addma.2021.102409. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102409>.

TIRADO-GARCIA, I.; GARCIA-GONZALEZ, D.; GARZON-HERNANDEZ, S.; RUSINEK, A.; ROBLES, G.; MARTINEZ-TARIFA, J. M.; ARIAS, A. Conductive 3D printed PLA composites: On the interplay of mechanical, electrical and thermal behaviours. **Composite Structures**, vol. 265, no. February, p. 113744, 2021. DOI 10.1016/j.compstruct.2021.113744. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113744>.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 43, no. 11, p. 1087–1092, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00127-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00127-5).

TURNER, B. N.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 21, no. 3, p. 250–261, 2015. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2013-0017>.

TRZEPIECIŃSKI, T.; NAJM, S. M.; SBAYTI, M.; BELHADJSALAH, H.; SZPUNAR, M.; LEMU, H. G. New advances and future possibilities in forming technology of hybrid metal–polymer composites used in aerospace applications. **Journal of Composites Science**, vol. 5, no. 8, 2021. <https://doi.org/10.3390/jcs5080217>.

UTELA, B.; STORTI, D.; ANDERSON, R.; GANTER, M. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP). **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 10, no. 2, p. 96–104, 2008. DOI 10.1016/j.jmapro.2009.03.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2009.03.002>.

VANAT, K. J.; BRAGHINI, A. O Uso De Ferramentas De Metal Duro No Torneamento Do Nylon. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, vol. 11, no. 1, p. 50–57, 2014. <https://doi.org/10.4322/tmm.2014.007>.

VAES, D.; COPPENS, M.; GODERIS, B.; ZOETELIEF, W.; VAN PUYVELDE, P.. Assessment of crystallinity development during fused filament fabrication through Fast

Scanning Chip Calorimetry. **Applied Sciences** (Switzerland), vol. 9, no. 13, p. 1–20, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9132676>.

VIGNESHWARAN, S.; JOHN, K. M.; DEEPAK JOEL JOHNSON, R.; UTHAYAKUMAR, M.; ARUMUGAPRABU, V.; KUMARAN, S. T. Conventional and unconventional machining performance of natural fibre-reinforced polymer composites: A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, vol. 40, no. 15–16, p. 553–567, 2021. <https://doi.org/10.1177/0731684420958103>.

VIGNESHWARAN, S.; SUNDARAKANNAN, R.; JOHN, K. M.; JOEL JOHNSON, R. Deepak; PRASATH, K. Arun; AJITH, S.; ARUMUGAPRABU, V.; UTHAYAKUMAR, M. Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, vol. 277, p. 124109, 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.124109. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124109>.

WAN, M.; LI, S. E.; YUAN, H.; ZHANG, W. H. Cutting force modelling in machining of fiber-reinforced polymer matrix composites (PMCs): A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 117, no. October 2018, p. 34–55, 2019. DOI 10.1016/j.compositesa.2018.11.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.11.003>.

WANG, C.; XIE, Y.; ZHENG, L.; QIN, Z.; TANG, D.; SONG, Y. Research on the Chip Formation Mechanism during the high-speed milling of hardened steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 79, p. 31–48, 2014. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2014.01.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.01.002>.

WANG, W.; YANG, D.; WANG, R.; WEI, F.; LIU, Min. The Optimization of Machining Parameters on Cutting Force during Orthogonal Cutting of Graphite/Polymer Composites. **Processes**, vol. 10, no. 10, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10102096>.

WANG, Y.; CHEN, Yukai; W., C.; HUANG, K.; CHEN, Z.; HAN, B.; ZHANG, Q. The process planning for additive and subtractive hybrid manufacturing of powder bed fusion (PBF) process. **Materials and Design**, vol. 227, p. 111732, 2023. DOI 10.1016/j.matdes.2023.111732. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111732>.

WEFLEN, E. A hybrid additive and subtractive manufacturing approach for multi-material components. **Gastronomía ecuatoriana y turismo local.**, vol. 1, no. 69, p. 57, 2020.

WEI, C.; SRIVASTAVA, D.; CHO, K. Thermal Expansion and Diffusion Coefficients of Carbon Nanotube-Polymer Composites. **Nano Letters**, vol. 2, no. 6, p. 647–650, 2002. <https://doi.org/10.1021/nl025554+>.

WIBERG, A.; PERSSON, J.; ÖLVANDER, J. Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 25, no. 6, p. 1080–1094, 2019. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2018-0262>.

WU, H.; DRZAL, L. T. Effect of graphene nanoplatelets on coefficient of thermal expansion of polyetherimide composite. **Materials Chemistry and Physics**, vol. 146, no. 1–2, p. 26–36, 2014. DOI 10.1016/j.matchemphys.2014.02.038. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.02.038>.

WU, X.; WANG, Z.; CHEN, J.; WANG, X.; QU, X. Research on Preparation and Performance of Epoxy Resin-Boron Nitride Thermal-Conductive Composite. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol. 394, no. 2, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/2/022052>.

WU, X.; WANG, Z.; CHEN, J.; WANG, X.; QU, X. Research on Preparation and Performance of Epoxy Resin-Boron Nitride Thermal-Conductive Composite. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol. 394, no. 2, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/2/022052>.

XIAO, K. Q.; ZHANG, L. C. The role of viscous deformation in the machining of polymers. **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 44, no. 11, p. 2317–2336, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(02)00178-9).

XINHONG, X.; HAIYOU, Z.; GUILAN, W.; GUOXIAN, W. Hybrid plasma deposition and milling for an aeroengine double helix integral impeller made of superalloy. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 26, no. 4, p. 291–295, 2010. DOI 10.1016/j.rcim.2009.10.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2009.10.002>.

XU, X.; CHEN, J.; ZHOU, J.; LI, B. Thermal Conductivity of Polymers and Their Nanocomposites. **Advanced Materials**, vol. 30, no. 17, p. 1–10, 2018. <https://doi.org/10.1002/adma.201705544>.

YANG, B.; WANG, H.; FU, K.; WANG, C. Prediction of Cutting Force and Chip Formation from the True Stress–Strain Relation Using an Explicit FEM for Polymer Machining. **Polymers**, vol. 14, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14010189>.

YOON, Y. J.; MOON, S. K.; HWANG, J. 3D printing as an efficient way for comparative study of biomimetic structures — trabecular bone and honeycomb. **Journal of Mechanical Science and Technology**, vol. 28, no. 11, p. 4635–4640, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-1031-4>.

YUAN, S.; SHEN, F.; CHUA, C. K.; ZHOU, K. Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: Materials and applications. **Progress in Polymer Science**, vol. 91, p. 141–168, 2019. DOI 10.1016/j.progpolymsci.2018.11.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.11.001>.

YUAN, S.; SHEN, F.; CHUA, C. K.; ZHOU, K. Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: Materials and applications. **Progress in Polymer Science**, vol. 91, p. 141–168, 2019. DOI 10.1016/j.progpolymsci.2018.11.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.11.001>.

ZENG, Y.; WANG, X.; QIN, X.; HUA, L.; LIU, G.; GUAN, S.. Laser ultrasonic inspection of defects in wire arc additive manufactured samples with different surface profiles. Measurement: **Journal of the International Measurement Confederation**, vol. 188, no. November 2021, p. 110597, 2022. DOI 10.1016/j.measurement.2021.110597. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110597>.



ZENG, Y.; WANG, X.; QIN, X.; HUA, L.; LIU, G.; GUAN, S. Laser ultrasonic inspection of defects in wire arc additive manufactured samples with different surface profiles. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 188, no. November 2021, p. 110597, 2022. DOI 10.1016/j.measurement.2021.110597. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110597>.

ZHANG, J.; LIOU, F. Adaptive slicing for a multi-axis laser aided manufacturing process. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 126, no. 2, p. 254–261, 2004. <https://doi.org/10.1115/1.1649966>.

ZHANG, J.; LIOU, F. Adaptive slicing for a multi-axis laser aided manufacturing process. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 126, no. 2, p. 254–261, 2004. <https://doi.org/10.1115/1.1649966>.

ZHANG, S.; ZHANG, Y.; GAO, M.; WANG, F.; LI, Q.; ZENG, X.. Effects of milling thickness on wire deposition accuracy of hybrid additive/subtractive manufacturing. *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 24, no. 5, p. 375–381, 2019. <https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1595925>.

ZHANG, P.; HU, Z.; XIE, H.; LEE, G. H.; LEE, C. H. Friction and wear characteristics of polylactic acid (PLA) for 3D printing under reciprocating sliding condition. *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 72, no. 4, p. 533–539, 2020. <https://doi.org/10.1108/ILT-11-2016-0280>.

ZHANG, R.; HE, X.; HUANG, G. A review of the slow relaxation processes in the glass-rubber transition region of amorphous polymers. *Phase Transitions*, vol. 88, no. 9, p. 843–858, 2015. <https://doi.org/10.1080/01411594.2015.1007373>.

ZHENG, Y.; AHMAD, R. Feature extraction and process planning of integrated hybrid additive-subtractive system for remanufacturing. *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 17, no. 6, p. 7274–7301, 2020. <https://doi.org/10.3934/MBE.2020373>.

ZHOU, B.; HE, W. N.; JIANG, X. Y.; TONG, Z. Z.; XU, J. T.; FAN, Z. Q. Effect of molecular weight on isothermal crystallization kinetics of multi-walled carbon nanotubes-graft-poly( $\epsilon$ -caprolactone). *Composites Science and Technology*, vol. 93, p. 23–29, 2014. DOI 10.1016/j.compscitech.2013.12.012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.12.012>.

ZHOU, Y.; YAO, Y.; CHEN, C. Y.; MOON, K.; WANG, H.; WONG, C. P. The use of polyimide-modified aluminum nitride fillers in AlN@PI/Epoxy composites with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation. *Scientific Reports*, vol. 4, p. 1–6, 2014. <https://doi.org/10.1038/srep04779>.

ZHOU, X.; DENG, J.; FANG, C.; LEI, W.; SONG, Y.; ZHANG, Z.; HUANG, Z.; LI, Y. Additive manufacturing of CNTs/PLA composites and the correlation between microstructure and functional properties. *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 60, p. 27–34, 2021. DOI 10.1016/j.jmst.2020.04.038. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.038>.

ZHOU, Y.; YAO, Y.; CHEN, C. Y.; MOON, K.; WANG, H.; WONG, C. P. The use of polyimide-modified aluminum nitride fillers in AlNPI/Epoxy composites with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation. **Scientific Reports**, vol. 4, p. 1–6, 2014. <https://doi.org/10.1038/srep04779>.

ZHU, D.; ZHU, Z. W.; QU, N. S. Abrasive polishing assisted nickel electroforming process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 55, no. 1, p. 193–196, 2006. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60396-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60396-5).

ZHU, D.; FENG, X.; XU, X.; YANG, Z.; LI, W.; YAN, S.; DING, Han. Robotic grinding of complex components: A step towards efficient and intelligent machining – challenges, solutions, and applications. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 65, no. November 2019, p. 101908, 2020. DOI 10.1016/j.rcim.2019.101908. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101908>.

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**, vol. 26, no. 7, p. 596–615, 2013. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.749530>.