
Pós-processamento de peças metálicas produzidas por manufatura
aditiva

Adriel Magalhães Souza

Pós-processamento de peças metálicas produzidas por manufatura aditiva

Adriel Magalhães Souza

***Orientador:* Prof. Assoc. Eraldo Jannone da Silva**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Escola de Engenharia da São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Mecânica. Área de concentração: Projeto, Materiais e Manufatura. EXEMPLAR CORRIGIDO.

**São Carlos
2023**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M719p Magalhães Souza, Adriel
 Pós-processamento de peças metálicas produzidas
 por manufatura aditiva / Adriel Magalhães Souza;
 orientador Eraldo Jannone da Silva. São Carlos, 2023.

 Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto,
 Materiais e Manufatura -- Escola de Engenharia de São
 Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

 1. Manufatura Aditiva de Metais. 2. Directed Energy
 Deposition (DED). 3. Integridade Superficial. 4.
 Acabamento Magnético-Abrasivo. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **ADRIEL MAGALHÃES SOUZA.**

Título da tese: "Pós-processamento de peças metálicas produzidas por manufatura aditiva"

Data da defesa: 01/03/2023.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Eraldo Jannone da Silva**

APROVADO

(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Associado **Éder Sócrates Najar Lopes**

APROVADO

(Universidade Estadual de Campinas /UNICAMP)

Prof. Titular **Reginaldo Teixeira Coelho**

APROVADO

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Dr. **Milton Pereira**

APROVADO

(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

Prof. Associado **Rosemar Batista da Silva**

APROVADO

(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Associado **Adriano Almeida Gonçalves Siqueira**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Antônio e Vilma, que, com muita dedicação e esforço, sempre me incentivaram a seguir meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio e Vilma, pelo amor e incentivo constante.

Ao Prof. Eraldo Jannone da Silva, cuja orientação, paciência e as constantes ajudas proporcionaram o desenrolar deste trabalho.

À Prof.^a Hitomi Yamaguchi Greenslet por todo suporte e permitir a realização do estágio no exterior. Muito obrigado por expandir meus horizontes relacionados à manufatura.

À minha noiva, Flávia Sanches, pelo carinho e amor, desde o início deste trabalho.

À minha madrinha, Vânia Leite, pelo enorme carinho.

Aos membros do grupo do Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS) e do *Nontraditional Manufacturing Laboratory* (NTML).

Ao Prof. Reginaldo Coelho Teixeira por me permitir vincular esta pesquisa ao Projeto Temático (2016/11309-0) e pelo apoio financeiro e científico.

Ao Prof. André Capaldo Amaral pelas análises biológicas.

Ao Prof. Carlos Alberto Fortulan pelo auxílio na preparação da termocera.

Ao Prof. Gherhardt Ribatski pelo empréstimo da câmara de alta velocidade.

Ao Prof. Nelson Batista de Lima pelas análises de tensão residual.

Aos técnicos, Adolfo Ferrarin, José Botelho e Tiago Camponucci, pela ajuda nos procedimentos operacionais.

Aos meus colegas de Medeiros-MG, pelos momentos de descontração.

À Blaser Swissslube do Brasil Ltda, em especial ao Marcelo Kuroda, pela doação do fluido de corte.

Ao *Materials Institute of Brazil* (MIB), em especial ao Marcelo Milan, pela colaboração.

À Saint-Gobain Abrasives, em especial ao Marcelo Sasaki e Fabio Freitas, pela doação dos rebolos e abrasivos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2019/10758-4, pela concessão da bolsa de estudos.

A todos estes colaboradores, meu sincero agradecimento.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

“Wyrð Bið Ful Aræd”

RESUMO

SOUZA, A. M. **Pós-processamento de peças metálicas produzidas por manufatura aditiva.** 2023. 164 f. Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Mecânica. Área de concentração: Projeto, Materiais e Manufatura. EXEMPLAR CORRIGIDO) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (PPGEM/EESC/USP), São Carlos – SP.

A Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como Impressão 3D, vem sendo considerada uma tecnologia com alto potencial disruptivo, com crescimento significativo nos últimos anos. Os produtos fabricados por esse processo são feitos pela adição de camadas de material até a formação do componente próximo à geometria final (*near net shape*). Em relação à MA de metais, um dos principais métodos é o *Directed Energy Deposition* (DED), que combina a entrega de material e energia para deposição simultânea camada a camada e, conseqüentemente, a formação da peça. Todavia, os componentes fabricados por esse método apresentam baixa precisão dimensional e baixa qualidade superficial, necessitando do pós-processamento. Baseado nesse contexto, este trabalho tem como objetivo geral investigar a viabilidade da adoção dos processos abrasivos de retificação e acabamento magnético-abrasivo (*Magnetic Abrasive Finishing* - MAF) para o pós-processamento de peças metálicas produzidas por DED. Características superficiais (retitude, rugosidades, microestrutura e tensão residual) e variáveis de saída do processo (taxa de remoção de material, tempo de processamento, forças de corte e energia específica) foram os parâmetros avaliados. Os resultados mostraram que a cadeia combinada de pós-processamento melhora erros de forma e qualidade superficial das peças fabricadas por DED, sem mudanças observáveis na microestrutura e dureza. A tensão residual foi alterada pela aplicação dos pós-processos, no qual o fresamento induziu tensões trativas, retificação introduziu tensões compressivas e o MAF não modificou significativamente o estado de tensão. Como principais conclusões, as operações de fresamento e retificação entre DED e MAF minimizaram o tempo de polimento. A adição da retificação diminuiu a remoção de material no MAF, mas reduziu o tempo necessário para o polimento e a energia específica geral.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva de Metais. Directed Energy Deposition (DED). Integridade Superficial. Acabamento Magnético-Abrasivo.

ABSTRACT

SOUZA, A. M. **Post-processing of metallic parts produced by additive manufacturing.** 2023. 164 p. Doctoral thesis (Doctor of Science, Program in Mechanical Engineering Area of concentration: Design, Materials and Manufacturing) – Graduate Program in Mechanical Engineering, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo (PPGEM/EESC/USP), São Carlos – SP.

Additive Manufacturing (AM), commonly referred to as 3D printing, has been considered a high-potential disruptive technology, with a significant increase in recent years. The products made through this process are created by adding layers of material until the forming of the component becomes close to the final geometry (near net shape). Regarding metal AM techniques, one of the main methods is Directed Energy Deposition (DED), which combines the material and energy supply for layer by layer simultaneous composition and, consequently, the forming of the piece. However, the components made through this method present low dimensional tolerance and poor surface finish, creating a need for post-processing. Based upon this context, this work mainly aims to investigate the feasibility of adopting abrasive processes (grinding and magnetic abrasive finishing - MAF) for post-processing of metallic parts produced with DED. Surface characteristics (shape deviation, roughness, microstructure, and residual stress) and process output variables (material removal rate, processing time, cutting forces, and specific energy) were the evaluated parameters. The results showed that the combined post-process chain improves form accuracy and surface quality of the DED-produced parts with no observable changes in their near-surface microstructure and hardness. The residual stress was altered by the application of post-processes, in which milling induced tensile residual stress, grinding introduced compressive residual stress, and MAF did not significantly modify the stress state. As main conclusions, milling and grinding operations between DED and MAF minimizes polishing time. Adding grinding lead to decrease in the material removal in MAF, but reduces the time needed for polishing and the overall specific energy.

Keywords: Metal Additive Manufacturing. Directed Energy Deposition (DED). Surface Integrity. Magnetic Abrasive Finishing (MAF).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos processos de manufatura.	10
Figura 2 – Número de publicações por ano: (a) MA e (b) DED.	14
Figura 3 – Aplicações atuais e potencial futuro da MA em diferentes indústrias.	15
Figura 4 – Exemplos de materiais gradientes feitos por MA.	21
Figura 5 – As 3 principais tecnologias que constituem a impressão 4D.	22
Figura 6 – Mapa de cobertura de resolução para várias técnicas de END com aplicabilidade a MA para defeitos geométricos.	29
Figura 7 – Previsão do mercado de MA.	30
Figura 8 – Comparação do processamento via MA e MC.	32
Figura 9 – Comparação entre o custo por peça utilizando MA e MC em relação ao (a) número de peça e (b) complexidade geométrica.	34
Figura 10 – Número de patentes de 1961-2014 relacionadas à MA.	36
Figura 11 – Efeito degrau de escala em superfícies planas (a) ou não planas (b).	37
Figura 12 – Principais parâmetros que afetam a qualidade superficial e dimensional de peças feitas por MA.	37
Figura 13 – Rugosidade típica alcançada por vários processos de manufatura.	39
Figura 14 – Fluxograma de possíveis operações de pós-processamento em peças fabricadas por MA.	41
Figura 15 – Princípios físicos envolvidos no DED em um determinado instante de tempo.	49
Figura 16 – Desenho esquemático do processo de DED.	50
Figura 17 – Parâmetros geométricos obtidos na camada depositada: (a) desenho esquemático e (b) foto.	54
Figura 18 – Casos possíveis de diluição: (a) baixa, (b) adequada e (c) alta.	54
Figura 19 – Esquema do princípio de processamento por MAF de superfícies planas (a) e cilíndrica interna (b).	59
Figura 20 – Principais variáveis do MAF.	62
Figura 21 – Exemplos de diferentes formatos de polo magnético.	63
Figura 22 – Processo MAF: (a) representação esquemáticas dos componentes principais; (b) esquema das forças no processo; e (c) foto do equipamento.	72
Figura 23 – Desenho esquemático das forças agindo nas MAPs durante a remoção de material: (a) visão geral e (b) forças decompostas.	73
Figura 24 – Diagrama esquemático da ação do abrasivo na superfície da peça: (a) profundidade de penetração (h_s) e (b) área projetada de penetração (A_p).	74

Figura 25 – Possibilidades de ocorrência durante o processo de MAF: (a) equilíbrio, (b) remoção de material, (c) condição sem corte e (d) ajuste do abrasivo.	74
Figura 26 – Profundidade de indentação para (a) superfície lisa e (b) rugosa.	76
Figura 27 – Deformação elástica na região de contato: (a) visão esquemática e (b) relações geométricas.	76
Figura 28 – Número de arestas ativas: (a) visão esquemática e (b) arranjo dos abrasivos.	78
Figura 29 – Fluxograma geral da metodologia.	83
Figura 30 – Rota de processamento em superfícies planas.	84
Figura 31 – (a) Distribuição do tamanho da partícula, (b) reconstrução volume do pó, (c) foto do processo de DED, (d e e) representação esquemática e amostra depositada com configuração A e B, (f) topografia da superfície, (g) seção transversal da amostra e (h) microestrutura.	86
Figura 32 – Pós-processamento por MAF em superfícies planas: (a) primeira e (b) segunda versão.	91
Figura 33 – Configuração esquemática para medição do campo magnético para polimento de superfícies planas: (a) alteração do eixo X e (b) alteração do eixo Z.	92
Figura 34 – Esquema dos testes definitivos de pós-processamento.	95
Figura 35 – Esquemático para medição das forças do polimento: (a) com escova flexível e (b) sem.	96
Figura 36 – Esquema do relógio comparador acoplado à máquina.	97
Figura 37 – Desenho representativo de alguns parâmetros para cálculo do h_{eq} no processo de fresamento.	98
Figura 38 – Esquema da medição de tensão residual e (b) direções da tensão e deformação principais.	100
Figura 39 – Rugosidades das amostras planas após os Testes A de retificação.	102
Figura 40 – Rugosidades das amostras planas após os Testes B de retificação.	103
Figura 41 – Rugosidades das amostras planas após variação das condições de dressagem.	104
Figura 42 – Rugosidades das amostras planas após os Testes C de retificação.	105
Figura 43 – Resumo das rugosidades das amostras planas após os Testes A, B e C de retificação.	106
Figura 44 – Resultado do campo magnético no dispositivo para polimento de peças planas.	108
Figura 45 – Aspecto visual e análise topográfica das superfícies planas após cada etapa de manufatura (aumento de 20x): (a) e (d) DED, (b) e (e) fresamento (FVc300), e (c) e (f) MAF (MAF15).	109
Figura 46 – Rugosidades das superfícies planas após cada operação na rota de processamento nº 1.	110
Figura 47 – Ferramenta MAF desenvolvida (a), detalhe da escova flexível próxima à peça (b) e distante da peça (c).	112

Figura 48 – Topografia e perfis de rugosidade das superfícies planas após cada operação na rota de processamento n° 2.	113
Figura 49 – Rugosidades das superfícies planas após DED e fresamento.	113
Figura 50 – Rugosidades das superfícies planas após fresamento (Ff254) e MAF: S_a (a) e S_z (b).	114
Figura 51 – (a) Pites superficiais após MAF, (b) pites analisados e (c) distribuição dos tamanhos dos pites.	115
Figura 52 – Rugosidades das superfícies planas após cada etapa na melhor sequência de fabricação.	115
Figura 53 – Topografia das superfícies planas após cada etapa da sequência de fabricação.	117
Figura 54 – Micrografias da superfície da peça após polimento.	118
Figura 55 – Observação da estabilidade da escova flexível magnética em diferentes rotações.	118
Figura 56 – (a) Rugosidades das amostras planas após os testes de fresamento na rota de pós-processamento 3 e (b) topografia da superfície.	119
Figura 57 – (a) Desvio geométrico após cada processo e (b) perfil primário após DED1, fresamento (M1) e retificação (G1).	121
Figura 58 – Condição inicial da superfície após fresamento (M1) e retificação (G1).	123
Figura 59 – Impacto do avanço do ímã e número de passes durante o MAF na superfície (R_z e R_{sk}) das amostras M1 e G1: perspectiva do tempo de polimento (a) e passes (b).	124
Figura 60 – Impacto do avanço do ímã e número de passes durante o MAF na topografia da superfície das amostras M1 e G1.	124
Figura 61 – Mapa topológico $R_{sk}-R_{ku}$ de cada respectivo processo.	125
Figura 62 – Microestruturas da seção transversal DED+M1+MAF(Vf200).	126
Figura 63 – (a) Perfil de dureza Vickers para diferentes cadeias de pós-processamento e (b) marcas de indentações.	127
Figura 64 – Tensões residuais das amostras após DED, fresamento, retificação e polimento	128
Figura 65 – (a) Taxa de remoção de material de cada respectivo processo e (b) evolução de remoção de material das amostras em diferentes condições de polimento.	129
Figura 66 – Forças de usinagem (a) fresamento (M1), (b) retificação (G3) e MAF(Vf200) (peça fresada).	130
Figura 67 – (a) Forças de corte e normal e (b) relação entre essas componentes para as três operações de pós-processamento.	132
Figura 68 – Energia específica versus espessura equivalente do cavaco para as três operações de pós-processamento.	133
Figura 69 – Energia específica total de cada respectiva cadeia de processo.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias de MA e suas definições.	3
Tabela 2 – Tipos de documentos publicados nas áreas de MA e DED.	11
Tabela 3 – Área de conhecimento dos documentos publicados nas áreas de MA e DED.	11
Tabela 4 – Principais fontes das áreas de MA e DED.	12
Tabela 5 – Principais países das áreas de MA e DED.	12
Tabela 6 – Principais afiliações das áreas de MA e DED.	13
Tabela 7 – Principais autores das áreas de MA e DED.	13
Tabela 8 – Características de desejáveis e possibilidades de produção nas indústrias que utilizam MA.	15
Tabela 9 – Principais questões relacionadas à MA.	18
Tabela 10 – Características do pó por processo de fabricação.	26
Tabela 11 – Técnicas de metrologia adequadas para MA.	28
Tabela 12 – Fatores favoráveis à MA e à MC.	32
Tabela 13 – Classes IT para vários processos de manufatura.	38
Tabela 14 – Comparação geral do efeito de diversas operações de pós-processamento (PP) na rugosidade do aço inoxidável 316L (ou 316) fabricado por MA.	42
Tabela 15 – Comparação dos parâmetros e condições usados nos processos de MAF para o pós-processamento de peças de 316L feitas por MA.	68
Tabela 16 – Comparação dos modelos do processo de MAF.	81
Tabela 17 – Composição química do aço inoxidável 316L.	84
Tabela 18 – Condições utilizadas na deposição por DED.	87
Tabela 19 – Condições e parâmetros utilizados no fresamento nas rotas de pós-processamento 1 e 2 das peças planas.	87
Tabela 20 – Condições e parâmetros utilizados nos Testes A de retificação para pós-processamento das peças planas.	89
Tabela 21 – Condições e parâmetros utilizados nos Testes B de retificação para pós-processamento das peças planas.	90
Tabela 22 – Condições e parâmetros utilizados nos Testes C de retificação para pós-processamento das peças planas.	90
Tabela 23 – Condições e parâmetros utilizados no MAF para pós-processamento das peças planas.	92
Tabela 24 – Condições dos testes definitivos de pós-processamento.	95

Tabela 25 – Comparação entre os volumes removidos obtidos pela balança e o relógio comparador.	96
Tabela 26 – Valores médios de retitude das superfícies após cada processo em μm	121

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação e justificativa para a pesquisa	5
1.3	Objetivos	7
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	7
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	7
1.4	Estruturação do trabalho	8
2	REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1	Análise bibliométrica	10
2.2	MA	17
2.2.1	<i>Materiais</i>	18
2.2.1.1	<i>Matérias-primas</i>	23
2.2.2	<i>Metrologia</i>	27
2.2.3	<i>Mercado</i>	29
2.2.4	<i>Fabricação (e pós-processamento)</i>	36
2.2.5	<i>DED</i>	48
2.3	MAF	57
2.3.1	<i>Desenvolvimento e conceitos fundamentais</i>	58
2.3.2	<i>Pós-processamento via MAF de peças feitas por MA</i>	65
2.3.3	<i>Análise teórica dos modelos do processo de MAF</i>	71
3	METODOLOGIA	83
3.1	Deposição	84
3.2	Testes-piloto de pós-processamento	87
3.3	Testes definitivos de pós-processamento	93
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	101
4.1	Resultados dos testes-piloto de pós-processamento	101
4.1.1	<i>Retificação</i>	101
4.1.2	<i>Rota de processamento nº 1</i>	107
4.1.3	<i>Rota de processamento nº 2</i>	111
4.1.4	<i>Rota de fresamento nº 3</i>	119
4.2	Resultados dos testes definitivos de pós-processamento	120

4.2.1	<i>Características superficiais</i>	120
4.2.2	<i>Taxa de remoção de material, tempo de processamento, forças de corte e energia específica</i>	128
5	CONCLUSÕES	135
5.1	Conclusões	135
5.2	Limitações e propostas de continuidade	138
	REFERÊNCIAS	141

INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma contextualização sobre a temática desta área de pesquisa, evidenciando vantagens e limitações das técnicas de manufatura com adição de materiais, bem como a descrição de possíveis soluções para os desafios a serem superados. Na sequência, são expostos a motivação e justificativa para a pesquisa. Em seguida, os objetivos almejados durante a elaboração do trabalho são apresentados. Por fim, apresenta-se a estruturação desta tese.

1.1 Contextualização

Segundo [Gibson, Rosen e Stucker \(2015\)](#), atualmente, a Manufatura Aditiva (MA) é o termo formalizado; outrora denominado de Prototipagem Rápida e/ou popularmente conhecido como Impressão 3D. [Bourell et al. \(2009\)](#)¹ citam que as fundações da MA são antigas e derivam de propostas para construir fotoescultura, a partir de camadas bidimensionais de materiais (patente criada por François Willème, datada de 1860 – para recriar objetos, incluindo formas humanas) e mapas topográficos de forma livre (patente criada por Joseph E. Blather, datada de 1892 – para criar moldes de mapas por meio de uma série de placas de cera). Em relação ao desenvolvimento das técnicas modernas de MA, pode-se citar: Otto John Munz, em 1951, propôs um sistema que possui características semelhantes às técnicas atuais de estereolitografia; Wyn Kelly Swainson, em 1971, propôs conceitos relacionados à fotopolimerização; Ciraud P. A., em 1972, apresentou os primeiros conceitos de uma tecnologia para fusão de pós por meio de feixes de laser² ou plasma; Takeo Nakagawa, em 1979, introduziu técnicas de adição por camadas que hoje em dia é conhecida como laminação de chapas metálicas (do inglês, *sheet lamination* - SL) para produzir ferramentas.

¹ [Bourell et al. \(2009\)](#) descrevem a cronologia de diversas patentes relacionadas à MA desde 1860 a 2001.

² Sigla inglesa que significa *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação).

De acordo com [Thompson et al. \(2016\)](#), tais invenções descritas acima só foram possíveis devido à invenção do computador, no final de 1940, avanços em desenho e manufatura auxiliado por computador (do inglês, *Computer Aided design* (CAD) e *Computer Aided Manufacturing* (CAM), respectivamente) e Comando Numérico Computadorizado (CNC), em 1950, desenvolvimento de resinas fotopoliméricas em meados de 1950, disponibilidade comercial de lasers, em 1960, e o início da redução de custo dos monitores de computador, nos anos de 1970. No entanto, conforme ressaltado pelos autores, a tecnologia de MA estava apenas no início, sem mercado comercial e pouco apoio para atividades de pesquisa e desenvolvimento.

Segundo [Gibson, Rosen e Stucker \(2015\)](#), com o natural desenvolvimento das tecnologias, entre os anos de 1980 e 1990 houve um acréscimo do número de patentes e publicações relacionadas à MA, desenvolvidas principalmente por pesquisadores e empresas do Japão, França e EUA. Em consonância com [Thompson et al. \(2016\)](#), entre os anos de 1990 e 2000 foram de crescimento para a área, período em que novas tecnologias surgiram (como a *electron-beam melting* - EBM) e as antigas foram melhoradas (devido à expiração de patentes antigas), softwares foram desenvolvidos para fatiamento, modelagem e simulação, os termos “Rapid Tooling”, “Rapid Casting”, “Rapid Manufacturing”, “Rapid Prototyping” e, até o mais popular, “3D printing” foram criados para evidenciar as capacidades de utilização da AM, e, por fim, a globalização foi impulsionada pela internet, facilitando o compartilhamento de conhecimento, desenvolvimento de códigos abertos e apoio internacional na área. [Thompson et al. \(2016\)](#) ressaltam que se as tendências continuarem, entraremos em um novo estágio da evolução, em que a MA tornar-se-á um paradigma de projeto, além de um meio de produção. Desta forma, pode-se dizer que a MA está modificando o modo de produção, design de produtos³, incentivando a criação de novos materiais e modificando estratégias de negócios, fazendo com que ocorra uma revolução nos paradigmas da manufatura.

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) – norma F2792-12a ([ASTM, 2013](#)) - classifica as tecnologias de MA em 7 categorias⁴: *Blinder Jetting*, *Extrusion*, *Jetting*, *Vat Photopolymerization*, *Powder Bed Fusion* (PBF), *Directed Energy Deposition* (DED) e *Sheet Lamination* (SL). Na Tabela 1 é apresentada uma breve descrição de cada um desses processos⁵.

As tecnologias supracitadas podem ser aplicadas em polímeros, madeira, cerâmicas e metais⁶. Segundo [DebRoy et al. \(2018\)](#), os materiais metálicos mais estudados na MA são: aços inoxidáveis, ligas de alumínio, aços Maraging, ligas de titânio, ligas de Cromo-Cobalto, superligas de níquel e metais preciosos. No tocante aos aços inoxidáveis, a liga AISI 316L se destaca como um dos materiais metálicos mais estudados em MA. A composição desse material é 66% Fe, 19% Cr, 9% Ni, 3% Mo e 2% Mn com Si e C (onde “L” indica baixo teor de C) e é

³ Denominado de *Design for Additive Manufacturing* - DfAM ([THOMPSON et al., 2016](#)).

⁴ Uma descrição detalhada de cada processo se encontra no livro de [Gibson, Rosen e Stucker \(2015\)](#). Neste trabalho, apenas as tecnologias relacionadas aos metais serão descritos com maiores detalhes.

⁵ Os termos foram mantidos em inglês devido à falta de uma tradução consolidada. O mesmo acontece a partir deste ponto no texto.

⁶ Combinações destes materiais também são possíveis, como no caso de compósitos ([THOMPSON et al., 2016](#)).

Tabela 1 – Tecnologias de MA e suas definições.

Categoria	Processo	Definição
1	<i>Blinder Jetting</i>	Deposição de um agente líquido para união de materiais em pó
2	<i>Extrusion</i>	Extrusão de material através de um bico ou orifício
3	<i>Jetting</i>	Deposição de material em forma de gotas
4	<i>Vat Photopolymerization</i>	O fotorpolímero líquido é curado por polimerização ativada por luz
5	<i>Powder Bed Fusion</i>	Aplicação de energia térmica para fusão de determinadas regiões de uma “ <i>powder bed</i> ”
6	<i>Directed Energy Deposition</i>	Aplicação de direta de energia térmica para fusão de materiais ao longo da deposição
7	<i>Sheet Lamination</i>	União de folhas de material para formar peças

Fonte: adaptada de (ASTM, 2013).

tipicamente não ferromagnético (BREME *et al.*, 2016). Segundo Ibrahim *et al.* (2017) e Axinte *et al.* (2019), as propriedades que se destacam no aço inoxidável 316L são a biocompatibilidade, resistência à corrosão, propriedades mecânicas, custo reduzido (quando comparado à outros biomateriais - como as ligas de titânio (HARUN *et al.*, 2018)), dentre outras. Essas características peculiares fazem desse material uma das ligas metálicas mais estudadas em MA (DEBROY *et al.*, 2018).

De acordo com Thompson *et al.* (2015), os processos de PBF e DED são os métodos mais utilizados para manufatura de materiais metálicos, cada qual com suas peculiaridades. Desta forma, estudos que tratam destes processos possuem relevância acadêmica e industrial reconhecida mundialmente. A escolha de qual processo utilizar se dá pela aplicação e necessidade do componente a ser manufaturado. Os métodos de PBF são mais utilizados em comparação com o DED, pois o PBF gera componentes com menores tolerâncias dimensionais e pode produzir peças com maior complexidade geométrica (SVETLIZKY *et al.*, 2021). No entanto, as tecnologias DED vêm se destacando devido às suas aplicações, como revestimentos (AHN *et al.*, 2016), materiais funcionais gradientes (HOFMANN *et al.*, 2014; ANSARI; JABARI; TOYSERKANI, 2021), reparo ou remanufatura de componentes danificados (SABOORI *et al.*, 2019; BENNETT *et al.*, 2018), adição de recursos a peças pré-existentes (YAMAZAKI, 2016) e outros. Algumas vantagens do DED são o potencial para fabricação de estruturas solidificadas direcionalmente (LIU *et al.*, 2021) e monocristalinas (ZHOU *et al.*, 2015), controle da microestrutura alterando os parâmetros do processo e misturas de matérias-primas (AYDOGAN; O’NEIL; SAHASRA-BUDHE, 2021), depósito de camadas externas de material com propriedades físico-mecânicas superiores que o substrato (RAI *et al.*, 2020), entre outros.

Apesar das características singulares dos processos DED, Gibson, Rosen e Stucker

(2015) destacam que as principais limitações são a baixa resolução (precisão dimensional) e baixa qualidade superficial da peça metálica (quando comparada aos processos tradicionais de manufatura, tais como fresamento e retificação), além de baixas velocidades de construção. Quando comparados aos processos de usinagem convencionais de fabricação mecânica, observam-se valores de precisão dimensional e qualidade superficial para peças feitas por DED semelhantes àqueles obtidos por processos de fundição e forjamento, evidenciando a necessidade do pós-processamento das peças metálicas.

Os processos de usinagem (convencional ou não-convencional) podem ser utilizados para pós-processamento dos componentes metálicos fabricados por MA. A depender dos requisitos funcionais da peça, tais condições podem ser alcançadas por processos tradicionais de usinagem e acabamento ou necessitar de processos avançados de acabamento. De acordo com Trent e Wright (2014), o fresamento é uma operação de usinagem versátil que é utilizada em vários tipos de superfícies, possuindo a fresa como ferramenta (tendo vários formatos para diferentes aplicações), sendo sua produtividade e a qualidade da peça afetadas pelas condições de usinagem. Segundo Malkin e Guo (2008), a retificação é tradicionalmente utilizada para dar um acabamento final à peça, sendo necessária quando se pretende produzir peças com qualidade superficial entre $0,15 < R_a < 1,5 \mu\text{m}$ e tolerâncias de fabricação normalmente entre 10-50 vezes o valor de R_a . Esses autores salientam que a eficiência e efetividade de um processo de retificação estão entranhadamente ligadas às condições de usinagem e do rebolo utilizado (ferramenta multicortante, composta por grãos abrasivos e aglomerante), bem como seu condicionamento (dressagem). Todavia, existe uma limitação da qualidade superficial alcançada por estes processos, que dependem das condições de corte e ferramentas empregadas. Nos casos em que a alteração das condições e ferramentas não permitam produzir peças com determinados requisitos funcionais (rugosidades em níveis submicrométricos, isento de rebarbas, sem marcas do avanço da ferramenta), faz-se necessário a aplicação de outros processos. Nesse sentido, o processo de polimento abrasivo-magnético (do inglês, *magnetic abrasive finishing* - MAF) é um processo avançado de acabamento que pode ser empregado para essa finalidade. Segundo Yang e Li (2018), MAF é um processo no qual certa quantidade de partículas abrasivas e ferromagnéticas são homogeneamente misturadas e unidas por campos magnéticos, entre os polos magnéticos e a peça, onde estão sendo exercidas forças magnéticas entre estes componentes. Por meio dos movimentos relativos e das forças envolvidas entre estes, ocorre-se a remoção de material da peça. Deste modo, as características geométricas do componente são alteradas (valores de rugosidade decrescem – podendo chegar à faixa de nanômetros – e rebarbas são removidas), fornecendo assim uma melhora na qualidade e integridade da superfície usinada.

Vários processos de polimento têm sido utilizados para pós-processamento de peças produzidas por MA, como o caso do tamboreamento (MELIA *et al.*, 2020), jateamento (TYAGI *et al.*, 2019), polimento eletrolítico (ROTTY *et al.*, 2016), eletroquímico (WANG; CASTELLANA; MELKOTE, 2021), laser (CHEN *et al.*, 2021), *shot-peening* (SUGAVANESWARAN *et al.*, 2018), por arrasto (KAYNAK; KITAY, 2019), MAF (YAMAGUCHI; FERGANI; WU, 2017), entre

outros. Apesar de ser possível utilizar processos abrasivos como etapa de polimento subsequente à fabricação por DED, devido aos elevados valores iniciais de rugosidade (por exemplo, $R_a > 20 \mu\text{m}$ e $R_z > 100 \mu\text{m}$) e erros de forma com centenas de micrometros, um longo tempo de pós-processamento e alto custo associado pode ser requerido para alcançar escalas de rugosidade de nano a submicrométrica. Em alguns casos, como no MAF, o processo não possui capacidade de corrigir os erros de forma de grande magnitude, visto que essa é uma operação de cópia de pressão. Dessa forma, uma etapa intermediária de pós-processamento entre a deposição e o polimento pode ser necessária para corrigir erros geométricos e dimensionais. Sendo assim, o fresamento pode ser uma alternativa para correções de tais erros. Entretanto, o fresamento possui uma limitação para entregar peças com elevado acabamento superficial. Assim, inserir processos abrasivos como a retificação (abrasivos aglutinados) e o MAF (abrasivos soltos) para o pós-processamento de peças metálicas produzidas por DED possuem potencial de melhorar a produtividade e qualidade da peça. Todavia, há limitações e desafios tecnológicos para cada uma dessas operações, as quais serviram como motivação da presente pesquisa, conforme discutido na seção 1.2.

1.2 Motivação e justificativa para a pesquisa

Destaca-se que a baixa precisão dimensional e qualidade superficial das peças metálicas produzidas por DED (semelhantes aos valores obtidos por fundição e forjamento) são as principais limitações desse processo, podendo ser solucionadas pela utilização de pós-processamento, em operações subtrativas de manufatura. O fresamento é uma opção viável devido à eficiência na correção de erros geométricos e dimensionais e redução da rugosidade com alta taxa de remoção de material. A retificação pode ser usada como um processo de acabamento para produzir peças com melhor acabamento superficial e tolerâncias dimensionais que o fresamento, a depender do tipo de rebolo e parâmetros utilizados. A utilização desses processos em centros de usinagem é viável para o pós-processamento de superfícies externas, incluindo peças planas, cilíndricas (usinagem por interpolação, por exemplo) e complexas (a complexidade é limitada pelos graus de liberdade da máquina). No entanto, mesmo implementando sistemas auxiliares na máquina e desenvolvendo ferramentas específicas que possam demandar altos recursos tecnológicos/econômicos, há uma limitação técnica para o pós-processamento de superfícies internas complexas, como utilizados em eletrodutos, micropalhetas, canais de resfriamento conformados, entre outros. Nesses casos, os processos de MAF são operações de acabamento fino que têm sido usadas para pós-processamento de peças produzidas por MA, que podem gerar componentes com rugosidade e/ou texturas que variam de escala subnanométrica a micrométrica e promover a funcionalização da superfície (por exemplo, fluxo de fluido, adesão celular, molhabilidade, resistência à corrosão, entre outros). Os processos de MAF removem material mecanicamente pela ação de abrasivos pressionados contra a superfície da amostra com ferramentas magnéticas suspensas em um campo magnético (SHINMURA *et al.*, 1990). Além disso, as operações de MAF podem ser

integradas em centros de usinagem, eliminando a necessidade de máquinas de acabamento abrasivo dedicadas, programas CAM específicos e diferentes fixações de peças para cada processo (MORIMOTO *et al.*, 2018). Outras vantagens do MAF é que a ferramenta de polimento não requer compensação nem dressagem, possui auto-adaptabilidade e controlabilidade (HENG; KIM; MUN, 2017), mas a baixa remoção de material é uma das limitações. Uma possível solução para superar essa questão é realizar MAF em alta velocidade, visando acelerar a velocidade relativa entre a ferramenta/abrasivo e a superfície alvo (velocidade de acabamento) para aumentar a remoção de material e, conseqüentemente, reduzir o tempo de pós-processamento.

Em relação à sequência típica de fabricação de peças metálicas para aplicações médicas (como é o caso do aço inoxidável 316L), pode ser dada pela deposição via DED, com a utilização de fresamento e/ou retificação (desbaste e/ou semiacabamento), seguido, por exemplo, de lixamento e polimento manual para melhorar a qualidade superficial, sendo essas duas etapas manuais pouco produtivas e requerem esforço de mão de obra. Desse modo, tornam-se necessários estudos que proponham uma cadeia que possa viabilizar a eliminação/encurtamento das etapas de fresamento e eliminação/redução das operações manuais pela estratégia combinada (fresamento+retificação+MAF), para encurtar a sequência e o tempo de fabricação, principalmente, em peças com geometrias complexas de maneira automatizada.

A incorporação dos processos abrasivos para o pós-processamento de peças metálicas produzidas por DED requer superar alguns desafios científicos. No tocante à retificação, sistemas de dressagem, refrigeração e fixação adequados são fundamentais o processo apresentar eficiência adequada. Já para o MAF, tamanho das partículas magnéticas, campo e forças magnéticas, polo magnético, rotação (velocidade de corte), velocidade de deslocamento (avanço) da ferramenta, entre outros, são algumas variáveis essenciais o processo ser suficientemente adequado. Além disso, devido à natureza dos processos abrasivos, a escolha do tipo e tamanho do abrasivo possui impacto direto na qualidade do produto final e, por isso, deve ser selecionado com base no material da peça, taxa de remoção de material desejada, rugosidade, entre outros. Dessa forma, a definição de algumas diretrizes (com base em critérios técnicos) pode auxiliar na tomada de decisão de estratégias e condições de corte adequadas para essas operações.

Com base nesse escopo, esta tese tende a contribuir como um estudo fundamental para o preenchimento da lacuna do atual paradigma da manufatura sobre a possibilidade da introdução de operações acabamento por abrasão e seu impacto na qualidade do produto final. Os impactos na superfície e as limitações de cada etapa de pós-processamento na cadeia de processo para peças metálicas produzidas por DED também são abordados. Feita esta apresentação do escopo em que se insere este trabalho, procurou-se, durante o desenvolvimento desta tese, almejar os objetivos que serão descritos a seguir.

Por fim, vale ressaltar o ineditismo da aplicação da técnica de polimento por MAF no Brasil. Por se tratar de um processo de usinagem pouco usual no país, foi necessária uma colaboração entre a USP e a Universidade da Flórida (UF) para superar científicos e tecnológicos

da aplicação dessa técnica para polimento de peças metálicas produzidas por DED, resultando no doutorado Sanduíche do autor desta tese. Pela singularidade e especificidade do tema, a Prof.^a Hitomi Yamaguchi Greenslet, com experiência e renome mundial trabalhando neste tema, acompanhou todo o desenvolvimento dessa pesquisa

1.3 Objetivos

Esta tese propõe atender ao objetivo geral e aos objetivos específicos, conforme apresentado abaixo.

1.3.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral desta tese é investigar a viabilidade da adoção dos processos abrasivos de retificação e MAF para o pós-processamento de peças metálicas produzidas por DED.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Derivados e com a finalidade de conduzir ao objetivo geral, os objetivos específicos são:

- Investigar e propor soluções tecnológicas para a introdução de processos abrasivos de retificação e polimento magnético abrasivo (MAF) em centros de usinagem.
- Definir as condições operacionais dos processos de retificação e MAF para pós-processamento de peças metálicas produzidas por DED, tendo como base requisitos de qualidade dimensional e superficial e produtividade.
- Investigar os efeitos da inserção de processos de retificação e MAF como etapas intermediárias de pós-processamento após a deposição por DED e a usinagem por fresamento, nas características superficiais de peças metálicas.
- Analisar os danos (sub)superficiais da peça (desvio de forma, rugosidade, microestrutura, dureza e tensão residual) causados pela sequência de usinagem adotada, bem como analisar, comparativamente, parâmetros de processo (forças de corte e energia específica) e produtividade (a taxa de remoção de material e tempo total de processamento) em função da cadeia de processo adotada.
- Propor critérios para a adoção dos processos abrasivos em função de parâmetros de rugosidade e energia total incorporada.

1.4 Estruturação do trabalho

A seguir, faz-se uma apresentação da estruturação deste trabalho, dividido em cinco capítulos.

O presente capítulo possui um caráter introdutório, cujo qual se descreve a contextualização do estudo, apresentação geral do problema, bem como a motivação e objetivos desse trabalho. No capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura. Por possuir um caráter qualitativo e quantitativo, três principais itens foram abordados: análise bibliométrica do tema de MA (i); características físico-técnicas relacionadas à MA (ii), com foco em materiais, fabricação, mercado e metrologia; e definições e princípios físicos do DED; e, por fim, detalhamento da técnica MAF (iii). No capítulo 3, a metodologia empregada no trabalho é exposta, descrevendo-se os materiais, métodos e meios científicos utilizados nos testes-piloto e definitivos. No capítulo 4, os resultados encontrados são expostos. Por fim, no capítulo 5 é apresentada as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO DA LITERATURA

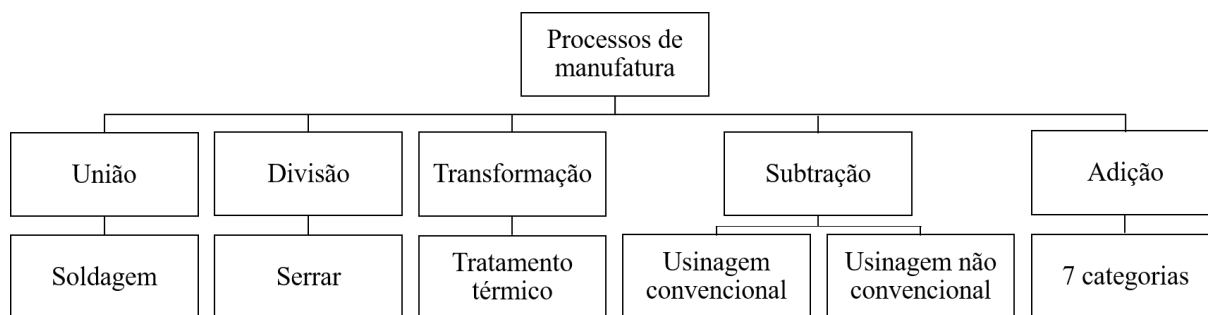
Este capítulo foi dividido em três principais tópicos. 1) Análise bibliométrica do tema com o intuito de quantificar, analisar e construir indicadores sobre a MA. 2) Visa-se a exposição acerca de quatro principais itens relacionados a MA, sendo eles: materiais, fabricação, mercado e metrologia. Adicionalmente, características do processo de DED serão abordados. Por fim, peculiaridades sobre o processo de MAF serão discutidas.

Inicialmente, vale destacar que os processos de manufatura vêm sendo utilizados para produção de componentes nos mais diversos setores industriais, de modo a prover as necessidades da sociedade, que vêm sendo constantemente alteradas por questões econômicas, sociais e ambientais. Segundo [Nassehi *et al.* \(2011\)](#), as tecnologias de manufatura dividem-se em cinco categorias, sendo elas descritas a seguir e ilustradas na Figura 1.

1. **União**, duas ou mais peças são unidas para formar menor quantidade de peças (soldagem e fixação de peças usando porcas e parafusos são alguns exemplos).
2. **Divisão**, sendo o oposto da anterior (o processo de serramento é um exemplo).
3. **Transformação**, sendo caracterizada pela alteração da peça, sem alteração de massa no corpo de prova (tratamentos térmicos e químicos e processos de conformação são alguns exemplos).
4. **Subtração**, ocorre a redução de massa da peça (como no caso dos processos de torneamento, fresamento e retificação).
5. **Adição**, ocorre adição de camadas de material até a formação da peça, o que leva ao aumento de massa, diferenciando este tipo de processo de manufatura dos demais.

De modo a avaliar o cenário atual e mundial sobre o tema desta tese, uma análise bibliométrica sobre MA e DED foi realizada, com abordagem descritiva da produção científica,

Figura 1 – Classificação dos processos de manufatura.



Fonte: adaptado de [Nassehi et al. \(2011\)](#).

conforme será abordado a seguir. Por fim, será discutida especificamente a produção científica da MA e DED sobre aço inoxidável 316 ou 316L.

2.1 Análise bibliométrica

A partir da base de dados Scopus¹ da Elsevier, duas pesquisas foram elaboradas, uma em relação a MA e outra em relação ao DED. Em relação ao primeiro item, as palavras-chave foram “Additive manufacturing”, “3D printing”, “3-D printing”, “Three Dimensional Printing”, “Three-Dimensional Printing”, “Rapid Prototyping”, “Rapid Manufacturing”, “Rapid Tooling”, “Rapid Casting”. Em relação ao segundo item, as palavras-chave foram: “directed energy deposition”, “laser engineered net shaping”, “directed light fabrication”, “direct metal deposition”, “laser cladding”, “laser-based metal deposition”, “laser freeform fabrication”, “laser direct casting”, “lasercast”, “lasform”, “Electron Beam Free Form Fabrication”, “Electron Beam Additive Manufacturing”, “Wire Arc Additive Manufacturing” e “Rapid Plasma Deposition”. Tais palavras-chave foram definidas de acordo com os termos que as tecnologias de MA e DED são e/ou já foram chamadas, de acordo com [Gibson, Rosen e Stucker \(2015\)](#), sendo que estas estão no título, resumo ou palavras-chave dos artigos analisados, tendo utilizado o operador booleano (OR) para pesquisa. O operador AND foi utilizado para encontrar especificamente a produção científica da MA e DED sobre aço inoxidável 316 ou 316L. De modo a filtrar os resultados, foram selecionados apenas artigos escritos na língua inglesa até o ano de 2022.

Em relação a MA, um total de 111.620 documentos foram selecionados (1.817 sobre aço inoxidável 316 ou 316L), evidenciando o vasto número de publicações na área. Em relação ao DED, 10.100 documentos estão relacionados a esse processo (527 sobre aço inoxidável 316 ou 316L). Essa seleção de documentos permitiu levantar o número de publicações de 1966 (primeiro artigo indexado na base de dados que fazia menção a esse tipo de processo) até 2022. Na Tabela 2 é apresentada a distribuição dos tipos de documentos. Dentre eles, destacam-se os publicados em revistas, seguidos pelos publicados em conferências.

¹ Disponível em scopus.com.

Tabela 2 – Tipos de documentos publicados nas áreas de MA e DED.

MA			DED		
Tipo de documento	Resultado	(%)	Tipo de documento	Resultado	(%)
Artigo (revista)	65.359	58,6	Artigo (revista)	6.817	67,5
Conferência	32.544	29,2	Conferência	2.692	26,7
Revisão	6.790	6,1	Revisão	227	2,2
Capítulo de livro	2.766	2,5	Revisão em conferência	177	1,8
Revisão em conferência	1.422	1,3	Capítulo de livro	124	1,2
Livro	263	0,2	Livro	9	0,1
Outros	2.476	2,2	Outros	54	0,5
Total	111.620	100	Total	10.100	100

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados obtidos na Scopus.

No que tange às áreas de conhecimento que mais produzem estudos vinculados à MA e ao DED, destacam-se a Engenharia e Ciência dos Materiais, conforme Tabela 3. Cabe ressaltar que as áreas analisadas são multidisciplinares e necessitam de conhecimentos interconectados que transitam desde a escala nanométrica até a mesoescala para a justificativa e conhecimento de mecanismos envolvidos nos processos.

Tabela 3 – Área de conhecimento dos documentos publicados nas áreas de MA e DED.

Nº	MA		DED	
	Área*	ND	Área*	ND
1	Engenharia	64.694	Engenharia	6.845
2	Ciência dos materiais	43.468	Ciência dos materiais	6.792
3	Ciência da computação	23.604	Física e Astronomia	4.311
4	Física e Astronomia	21.000	Ciência da computação	1.202
5	Medicina	10.593	Química	966

*Segundo critérios da Scopus.

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados obtidos na Scopus.

Na Tabela 4 é apresentada a relação entre as cinco principais fontes (jornais, *proceedings*, conferências) com o número de documentos (ND) publicados e seus respectivos Fatores de Impacto (FI) para o ano de 2021. Em relação à MA, o Additive Manufacturing foi a fonte com maior número de documentos publicados, representando 2,1% do total de publicações. Para o DED, foi o Surface and Coatings Technology (com 4,9%), indicando uma das principais aplicações do processo, que é a alteração de características funcionais de superfícies. O periódico Additive Manufacturing foi o que apresentou maior FI, dentre os analisados. Na Tabela 4 são indicados aos pesquisadores da área onde publicar seus futuros trabalhos, incluindo estudos que serão derivados dessa pesquisa.

Em relação aos países de origem dos referidos estudos, destacam-se China e Estados Unidos da América (EUA), como os mais prolíficos, conforme Tabela 5. Tal fato pode ser justificado pela realidade fabril desses países, com foco na produção de produtos manufaturados. Cujas fabricação é dependente de estratégias de crescimento econômico do país e de investimentos

Tabela 4 – Principais fontes das áreas de MA e DED.

Nº	MA				DED			
	Fonte	ND	(%)	FI*	Fonte	ND	(%)	FI*
1	Additive Manufacturing	2.357	2,1	11,6	Surface and Coatings Technology	493	4,9	4,9
2	Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering)	1.666	1,5	-	Additive Manufacturing	284	2,4	11,6
3	Materials	1.574	1,4	3,7	Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering)	276	2,7	-
4	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	1.491	1,3	3,6	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	275	2,7	3,6
5	Rapid Prototyping Journal	1.433	1,3	4,0	Materials Science and Engineering A	225	2,2	6,0

*Dados de 2021.

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados obtidos na Scopus.

estatais ou privados, para que esses países possam se configurar, em nível mundial, no âmbito da competitividade entre empresas e/ou em novas oportunidades estratégicas, atrelados ao investimento em educação para o desenvolvimento de tecnologias, resultando no aumento do número de publicações de novos trabalhos. O Brasil encontra-se na 19ª colocação do ranking, em relação a MA e em 18ª, em relação ao DED, com 1.641 e 111 documentos publicados nessas áreas, respectivamente. Os números do Brasil são semelhantes aos de países como Suíça, Polônia, Taiwan, África do Sul e Holanda.

Tabela 5 – Principais países das áreas de MA e DED.

Nº	MA		DED	
	País	ND	País	ND
1	EUA	30.101	China	4.031
2	China	17.610	EUA	1.664
3	Alemanha	9.251	India	592
4	Reino Unido	8.217	Alemanha	525
5	Itália	5.421	Reino Unido	514

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados obtidos na Scopus.

Ainda em termos de origem das publicações, foi realizada uma análise das principais afiliações (centros de pesquisa, universidades, institutos), conforme Tabela 6. Nota-se uma superioridade numérica de afiliações providas da China, sendo a agência estatal do Ministério Chinês a principal delas para ambas as áreas aqui analisadas. Tal fato reflete os investimentos na educação do país, nos quais, muitas vezes, são revertidos em produtos, processos e tecnologias inovadoras que permitem atender às necessidades de consumo da sociedade global.

Quanto à análise de autoria, na Tabela 7 é apresentada os autores que mais publicaram nas respectivas áreas aqui analisadas. Em relação à MA, destaca-se o Prof. Dr. Kai Chee Chua como o principal pesquisador da área, da Universidade de Tecnologia e Design de Singapura, com 247

Tabela 6 – Principais afiliações das áreas de MA e DED.

Nº	MA			DED		
	Afiliação	ND	País	Afiliação	ND	País
1	Ministry of Education	1.662	China	Ministry of Education	448	China
2	Nanyang Technological University	2666	Singapura	Chinese Academy of Sciences	546	China
3	Chinese Academy of Sciences	1.252	China	Northeastern University	192	EUA
4	CNRS Centre National de la Recherche Scientifique	1.223	França	Tsinghua University	172	China
5	School of Mechanical and Aerospace Engineering	990	China	Northwestern Polytechnical University	159	China

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados obtidos na Scopus.

documentos indexados na Scopus (dentre os documentos aqui analisados) e um Índice H^2 de 78. Em relação ao DED, destaca-se o Prof. Dr. Jyotirmoy Mazumder, atuando na Universidade de Michigan, com 118 documentos (relacionados apenas aos documentos aqui analisados) e um Índice H de 55. Os autores da Tabela 7 são os pesquisadores que mais contribuem para o progresso científico-tecnológico da área.

Tabela 7 – Principais autores das áreas de MA e DED.

Nº	MA				DED			
	Pesquisador	ND	País de atuação	Índice H	Pesquisador	ND	País de atuação	Índice H
1	Chua, C.K.	247	Singapura	78	Mazumder, J.	118	EUA	55
2	Singh, R.	195	India	44	Bandyopadhyay, A.	98	EUA	76
3	Yeong, W.Y.	157	Singapura	55	Lin, X.	91	China	55
4	Li, D.	153	China	47	Brandt, M.	79	Austrália	52
5	Williams, C.B.	184	EUA	42	Li, H.	71	Austrália	55

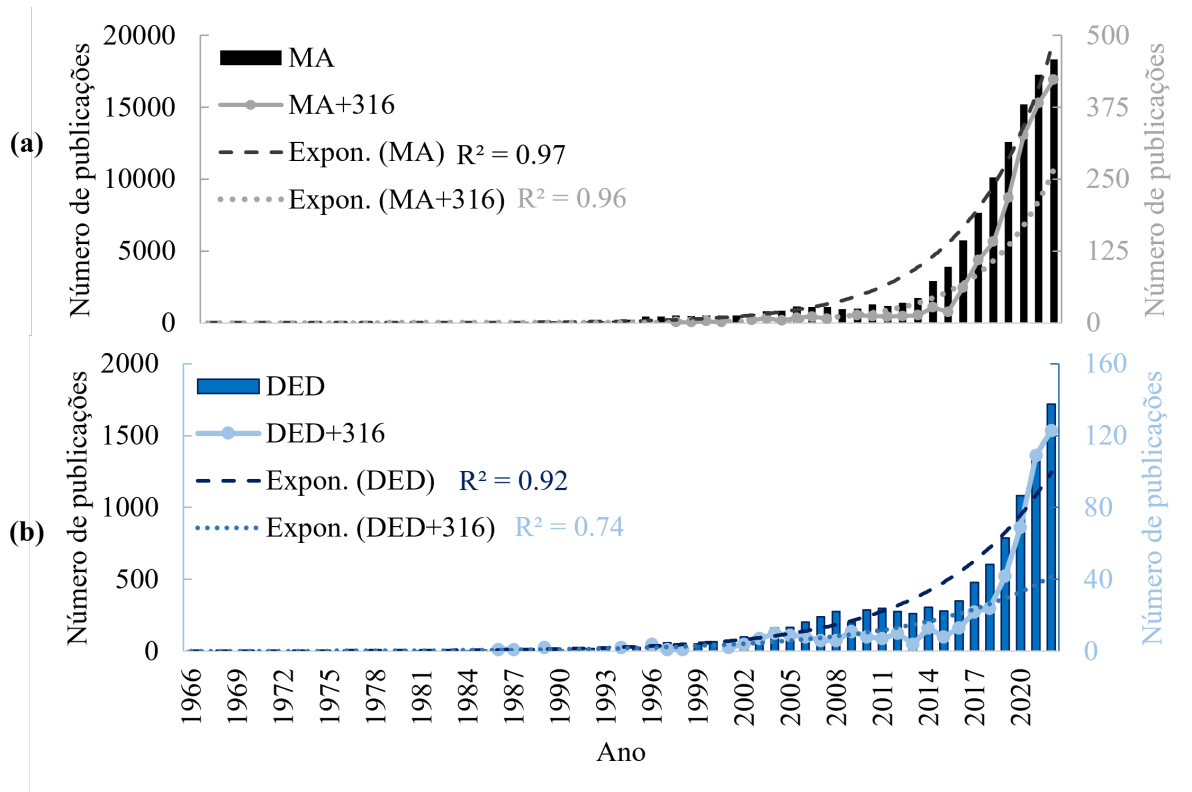
Fonte: Elaborada pelo autor, com dados obtidos na Scopus.

Por fim, na Figura 2 é apresentada a evolução de produção científica de 1966 (data da primeira publicação na área) até 2022 (total de 56 anos). O ano de 2022 representou o ano com maior número de publicações da história, tendo 18.327 documentos publicados na área de MA (423 sobre aço inoxidável 316 ou 316L) e 1.718 em relação ao DED (127 sobre aço inoxidável 316 ou 316L). Ambas apresentam uma elevada taxa de crescimento. Para a MA, nos últimos 5 e 10 anos, o número de publicações representa 66 e 86%, respectivamente, do total avaliado. Já para o DED, nesse mesmo período, o crescimento foi de 55 e 72%, respectivamente. Em relação as publicações sobre aço inoxidável 316 ou 316L, na área de MA, nos últimos 5 e 10

² Um índice para quantificar a produção de pesquisa científica, sendo calculado pelo número de artigos com citações maiores ou iguais a esse número (HIRSCH, 2005).

anos, o percentual é igual a 82 e 95%, respectivamente. Já para o DED, esses valores são de 70 e 81%, respectivamente. Dessa forma, é possível destacar uma tendência de crescimento de produção científica para ambas as áreas, indicando o atual escopo em que esta tese está inserida. Em termos de crescimento, pode-se destacar que a curva de tendência que melhor se ajusta é dada por uma equação exponencial.

Figura 2 – Número de publicações por ano: (a) MA e (b) DED.



Fonte: Elaborada pelo autor, com dados obtidos na Scopus.

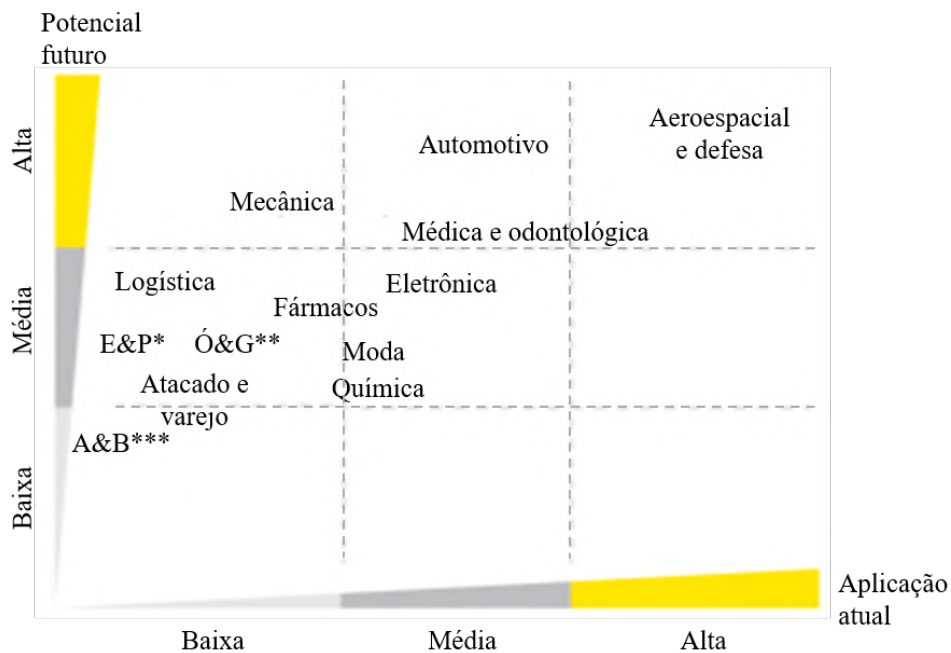
Esse crescimento de publicações nas áreas aqui analisadas, pode ser justificado pela vasta variedade de aplicações dessas tecnologias, sendo apropriado nos mais diversos setores industriais da economia, tais como: aeroespacial, automotivo, médico, químico, moda, ferramentaria, construção civil, entre outros. Conforme apontado por [Campbell et al. \(2011\)](#) e [Petrick e Simpson \(2013\)](#), a MA vem sendo considerada uma tecnologia com alto potencial disruptivo nessas indústrias, com o objetivo de formar o componente próximo à geometria final (*near net shape*), sendo aplicado especialmente em produtos com geometrias complexas. Assim sendo, essa tecnologia é aplicada em peças, em geral, com alto valor agregado. Na Tabela 8 são resumi-das as características desejáveis e possibilidades de produção de componentes para as indústrias supracitadas por meio das tecnologias de MA. Na Figura 3 é apresentada a relação entre futuro potencial e atual aplicação das tecnologias de MA para algumas indústrias. [Gao et al. \(2015\)](#) ressaltam que o impacto e aplicação das tecnologias de MA variam de uma escala nanométrica (como no caso de bioimpressão) até mesoescala (como no caso de construção de casas ou outras estruturas arquitetônicas).

Tabela 8 – Características de desejáveis e possibilidades de produção nas indústrias que utilizam MA.

Automotiva	Integração de partes em um única peça Alteração de meios de produção Produção de peças de reposição e acessórios
Aeroespacial	Produção de peças com geometria complexas Controle de densidade, propriedades mecânicas Produção de peças mais leves
Bens de consumo	Produção de acessórios com geometria complexas Criação de equipamentos de proteção exclusivos Criação de protótipos multicoloridos
Civil	Possibilidade de novos projetos Projeto ambientalmente sustentável Construção isento de cimento
Médica e farmacêutica	Planejamento de cirurgias com o uso de modelos atômicos precisos Desenvolvimento de órteses e próteses exclusivos ao paciente Impressão de tecidos vivos biodegradáveis

Fonte: adaptado de [Tofail et al. \(2018\)](#).

Figura 3 – Aplicações atuais e potencial futuro da MA em diferentes indústrias.



*Energia e serviços públicos, **Óleo e gás, *** Alimentos e bebidas.

Fonte: adaptado de [EY \(2016\)](#).

Na área aeronáutica, [Gisario et al. \(2019\)](#), [Najmon, Raeisi e Tovar \(2019\)](#), [Singamneni et al. \(2019\)](#) e [Yusuf, Cutler e Gao \(2019\)](#) elaboraram artigos de revisão sobre o impacto das tecnologias de MA de metal, no setor de aviação. Pode-se destacar a redução de massa dos componentes depositados como um dos principais impactos nessa área, visto que, segundo [Ezugwu \(2005\)](#), a redução de um quilograma pode gerar a economia de combustível de até US\$ 150.000, ao longo da vida do produto.

Na indústria automotiva, [Wahlström e Sahlström \(2016\)](#) analisaram o *benchmarking* das tecnologias de MA aplicadas nessa área, destacando possibilidades de implementação na produção de componentes nesse setor. Podem-se citar os seguintes exemplos de empresas que utilizaram a MA em algum de seus componentes: Audi AG, parte do grupo Volkswagen ([WORLD, 2005](#)), Lamborghini, também faz parte do grupo Volkswagen ([DAVIES, 2019](#)), BMW ([SCHILLMOELLER, 2015](#)), Ford ([MEARIAN, 2014](#)), General Motors (GM) ([LIENERT, 2020](#)), Honda ([BOISSONNEAULT, 2020](#)), entre outras. Nesse sentido, destaca-se que os principais fabricantes de carros do mundo utilizam processos de MA na fabricação de algum componente, evidenciando a aplicabilidade das tecnologias no setor.

Na indústria médica, farmacêutica, química e mineração, as aplicações são as mais diversas, como a criação de remédios sobre demanda do paciente ([TRIVEDI et al., 2018](#)), órteses e próteses (também feitos sob medida, o que permite uma melhor adaptação do paciente ao objeto) ([JIN et al., 2015](#)), modelos de tumores ou órgãos humanos (o que facilita a visualização e interpretação dos resultados de possíveis cirurgias) ([THOMPSON et al., 2016](#)), respiradores mecânicos, *Swab* de nasofaringe, máscaras protetoras, entre outros componentes que foram desenvolvidos por MA, como solução (rápida) para minimização dos efeitos, controle e prevenção da COVID-19, que podem ter salvado milhares de vidas no mundo ([GRIFFITHIS; O'CONNOR; DAVIES, 2020](#)) e modelos de terrenos, fósseis e cristais podem ser criados, permitindo uma melhor visualização e entendimento de suas características morfológicas ([ISHUTOV et al., 2018](#)).

Na indústria de bens de consumo, [Thompson et al. \(2016\)](#) ressaltam que os processos de MA podem produzir componentes personalizados, tais como: obras de arte, brinquedos, joias, bolsas, roupas, sapatos, entre outros. Isso pode fazer com que ocorra produção de objetos únicos devido ao alto grau de customização, com elevada qualidade e segurança, o que é valorizado nessas áreas.

Na construção civil, pode-se citar como exemplo o projeto *Contour Crafting*³ que permite a construção de casas ou edifícios ([KHOSHNEVIS, 2004](#)) e a empresa *Total Kustom* de *Andrey Rudenko* ([RUDENKO, 2020](#)). Nesse sentido, [Paolini, Kollmannsberger e Rank \(2019\)](#) discutem as principais aplicações e oportunidades nessa área. No entanto, como desafio ainda a ser superado, os autores destacam que ainda faltam dados experimentais e modelos validados, de modo a garantir a estabilidade das estruturas feitas por estas tecnologias. Nesse sentido, engenheiros e arquitetos podem utilizar de novas ferramentas para alcançar novos designs, buscando soluções inovadoras e sustentáveis que podem aproveitar melhor o solo, podendo gerar características únicas para o espaço urbano.

Outra importante área de aplicação é a de ferramentas para manufatura, como exemplo pode-se citar a viabilidade de fabricação de moldes e matrizes, fundamentais na área de injeção e forjamento. Nesse sentido, é possível a geração de canais de resfriamento conformais (maior

³ Mais informações estão disponíveis em: countorcrafting.com.

desempenho de refrigeração), o que torna sua vida útil mais elevada, aumentando-se assim a efetividade da ferramenta (TUTESKI; KOČOV, 2018; SOSHI *et al.*, 2017) e viável de depositar-lhe camadas, com um material mais nobre (propriedades mecânicas superiores ao substrato), também de modo a diminuir o desgaste e aumentar a vida útil (AHN *et al.*, 2016). Adicionalmente, após o desgaste, existe a alternativa do reparo ou sua remanufatura, feitos principalmente pelo processo de DED (SABOORI *et al.*, 2019). Além dessas aplicações, outras ferramentas e componentes auxiliares podem ser fabricados pelos processos de MA, tais como mandris hidráulicos (MAPAL, 2015), extensômetros (do inglês, *strain gauge*) (STANO *et al.*, 2019), dispositivos de fixação (KRZMAR; PILIPOVIĆ; ŠERCER, 2016), gabaritos (HIEMENZ, 2015), entre outros. Nesse sentido, pode-se ressaltar o paradoxo de produzir peças em MA para MC, porém isso indica que os processos de MA podem ser utilizados como auxiliares nas linhas de produção, sendo especialmente viáveis para pequenos lotes e fabricação de ferramentas novas e/ou especiais.

Uma outra possível aplicação é a utilização de MA em bases lunares, com o aproveitamento dos próprios recursos da lua como matéria-prima (no caso, regolito lunar), de modo a minimizar a quantidade de material na viagem espacial (e, conseqüentemente, gerar economia de combustível) e a luz do sol como fonte de energia no PBF (LBEAGA-MARTÍNEZ *et al.*, 2017).

Por fim, pode-se destacar que a análise bibliométrica mostrou-se eficiente para compreender o cenário científico atual e mundial da área, podendo-se concluir que as tecnologias de adição de material mostram-se aplicáveis nas mais diversas áreas, evidenciando sua capacidade e potencial. Desta forma, espera-se que desenvolvimento dessas continuem e sejam estudadas e utilizadas cada vez mais, de modo a contribuir com avanços à sociedade. Após a abordagem bibliométrica do cenário mundial do tema, foi realizada uma revisão sistemática da literatura nas bases de dados da Scopus e Web of Science, com foco em artigos publicados nos últimos cinco anos que envolvam pós-processamento do aço 316L fabricado por MA. Procurou-se efetivamente artigos que abordaram a alteração da qualidade superficial por meio do fresamento, retificação e MAF, resultando em 17 publicações (8, 3 e 6, respectivamente). Tais artigos são apresentados nos Subitens 2.2.4 e 2.3.2. A seguir, serão discutidos aspectos relacionados à MA, bem como algumas especificidades do tema.

2.2 MA

Segundo Tofail *et al.* (2018), os principais itens da MA são relacionados aos materiais, fabricação, mercado e metrologia⁴. Na Tabela 9 é apresentada um resumo das questões relacionadas aos itens. A seguir, cada um será descrito detalhadamente.

⁴ Além destes, Gao *et al.* (2015) incorporam as ferramentas computacionais (softwares, drivers, hardwares, etc) ao desenvolvimento da MA.

Tabela 9 – Principais questões relacionadas à MA.

Materiais	Técnicas de manufatura, comunicação de dados e mudanças no sistema de manufatura associada à Indústria 4.0
	Homogeneidade
	Propriedades superficiais e necessidade de processos de acabamento
Metrologia	Matéria-prima em escala nanométrica-micrométrica
	Necessidade de garantia de qualidade em tempo real
	Monitoramento e controle de modo a otimizar o processo
Mercado	Medições em tempo real
	Alta precisão e elevada taxa de aquisição
	Indústria 4.0 (inovações digitais)
Fabricação	Elevada variedade de indústrias (representando um mercado multimilionário)
	Máquinas mais baratas tornam a MA mais acessível
	Evolução da tecnologia de fabricação camada-a-camada com maior versatilidade, flexibilidade e customização
	Várias classes de materiais, incluindo suas combinações
	Desenvolvimento de sistema autônomo, robusto, fácil de usar, seguro e integrado que forneceria a energia necessária, movimento e velocidade de varredura e alta resolução para fabricação de peças

Fonte: adaptado de [Tofail et al. \(2018\)](#).

2.2.1 Materiais

Conforme já mencionado, os processos de MA podem ser aplicados em polímeros, madeira, cerâmica, metais e na combinação desses (no caso de compósitos) ([THOMPSON et al., 2016](#)). Além desses, [Bourell et al. \(2017\)](#) citam o chocolate como um caso especial de aplicação de algumas tecnologias da MA (especificamente, os processos de *extrusion* e PBF). Em relação aos metais, os tipos mais estudados são: aços inoxidáveis (304L e 316L), ligas de alumínio (AA6061 e AA2039), aços Maraging (M300 e M300), ligas de titânio (Ti-6Al-4V e CP Ti), ligas de Cromo-Cobalto (Co-Cr-Mo e Stellite 6), superligas de níquel (IN718 e IN625) e metais preciosos (ouro e platina) ([DEBROY et al., 2018](#)). Uma lista de 45 materiais diferentes utilizados na MA pode ser encontrada no relatório da [Gridlogics \(2014\)](#).

Na literatura, diversos artigos de revisão sobre as diferentes classes de materiais são encontrados, tais como os trabalhos de [Frazier \(2014\)](#), [Kok et al. \(2018\)](#), [Bajaj et al. \(2020\)](#), [Bourell et al. \(2017\)](#), [Ngo et al. \(2018\)](#), [Li et al. \(2019\)](#) e [Haghdadi et al. \(2021\)](#).

[Frazier \(2014\)](#) elaborou um artigo de revisão sobre MA de metais, discutindo as principais tecnologias, materiais utilizados (bem como suas propriedades), desafios e considerações tecnológicas, econômicas e ambientais dos processos. No artigo de revisão de [Kok et al. \(2018\)](#), os autores avaliaram os fatores que contribuem para anisotropia e heterogeneidade na microestrutura (morfologia dos grãos, textura cristalográfica, defeitos de falta de fusão, transformação de fases, recristalização heterogênea, entre outros), propriedades mecânicas (tensão, tenacidade à fratura, compressão, fadiga e dureza) em diversos materiais metálicos produzidos por diferentes

tecnologias de MA. Os autores concluíram que ajustar a orientação da construção (a melhor forma é a peça orientada horizontalmente ao longo das direções da carga) e especificar uma espessura de seção transversal mínima foram formas de reduzir esses efeitos. [Bajaj et al. \(2020\)](#) também elaborou um artigo de revisão com foco na MA de metais, porém com foco nas microestruturas resultantes, assim como no impacto das condições dos processos nas propriedades mecânicas e eletroquímicas dos metais de diferentes classes (austeníticos, martensíticos, endurecido por precipitação, duplex, aços TRIP/TWIP⁵, aços maraging, aços ferramenta e aços reforçados por dispersão de óxido⁶. [Bourell et al. \(2017\)](#) produziram um artigo de revisão com foco nos materiais para MA, incluindo polímeros, metais e suas ligas, cerâmicas e compósitos e suas propriedades físicas, mecânicas, ópticas e elétricas foram analisadas. Nesse sentido, [Ngo et al. \(2018\)](#) também elaboraram um artigo de revisão com foco nos materiais, além dos materiais anteriormente citados. Os autores também discutiram a utilização de outros materiais na MA, como o concreto para construção civil e infraestrutura, biomateriais para geração de tecidos, órgãos e células através da biofabricação (pesquisas *in vitro*, *in vivo* e *in situ*⁷ já foram reportadas com sucesso para manufatura de cartilagem, pele, ossos, válvulas aórticas, entre outras partes do corpo do humano) e remédios personalizados (dosagem adequada para determinado paciente⁸). [Li et al. \(2019\)](#) também elaboraram um artigo de revisão sobre os novos materiais da MA, onde são discutidas 12 classes de materiais (uma delas foi aquela das ligas de alta entropia – que não foram abordados pelos outros estudos). [Haghdadi et al. \(2021\)](#) focaram em discutir como a MA pode permitir a fabricação de peças metálicas com propriedades superiores quando comparadas àquelas produzidas por processos convencionais de manufatura.

Na classe de materiais avançados, [Bandyopadhyay e Heer \(2018\)](#) elaboraram um artigo sobre multimateriais feitos por MA, discutindo a possibilidade de utilização de (novos) materiais tecnologicamente modificados com propriedades superiores em locais específicos da peça e desenvolvidos sob demanda para determinada aplicação. Os autores exemplificaram os multimateriais por meio de uma analogia de uma barra de chocolate feita em MA, em que o usuário/cliente (a depender do seu gosto) personalizará seu próprio chocolate, adicionando, por exemplo, caramelo em determinadas partes no seu interior e um revestimento de manteiga de amendoim. Essa mesma ideia pode ser implementada para as classes de materiais utilizados na engenharia, de modo a, por exemplo, criar um multimaterial de metal de alto desempenho, de forma a ser o caramelo um material cerâmico para aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão, e a manteiga possa ser um material biocompatível que facilite a osteointegração em implantes. Tal tecnologia ainda está na fase inicial de desenvolvimento (porém pesquisas já

⁵ TRIP e TWIP são as siglas inglesas para *Transformation Induced Plasticity* e *Twinning Induced Plasticity*, ambos são aços autênticos metaestáveis que mostram transformação induzida por deformação (no caso do TRIP) ou maclação (no caso do TWIP) ([BAJAJ et al., 2020](#)).

⁶ Referenciado como aços ODS (do inglês, *Oxide Dispersion Strengthened steels*) e utilizados em aplicações com altas temperaturas de trabalho ([BAJAJ et al., 2020](#)), como pás de turbina e trocadores de calor.

⁷ A bioimpressão *in situ* para regeneração de tecidos é um paradigma avançado que mudará a indústria biomédica ([NGO et al., 2018](#)).

⁸ [Trivedi et al. \(2018\)](#) discutem as potenciais aplicações, desafios e limitações de remédios feitos por MA.

mostram aplicações do mundo real), podendo mudar os paradigmas de produção.

Também na classe de materiais avançados, Hofmann *et al.* (2014), Loh *et al.* (2018), Sarathchandra, S. e Venkaiah (2018), Zhang *et al.* (2019) e Ansari, Jabari e Toyserkani (2021) elaboraram artigos de revisão sobre MA de materiais funcionais gradientes⁹ (do inglês, *Functionally graded materials* - FGMs), nos quais possuem alteração de composição/constituintes, microestrutura ao longo de pelo menos uma direção da peça, resultando em diferentes propriedades, em diferentes pontos. Essa técnica é especialmente interessante no DED, pois possibilita o revestimento com materiais de propriedades desejadas, mais nobres que àqueles da base e também pode ser aplicada em outros processos de MA¹⁰, tais como *extrusion*, PBF, *sheet lamination* e *jetting*.

Hwang *et al.* (2018) apresentaram um exemplo de aplicação de FGM em uma engrenagem de titânio feita por DED, em diferentes atmosferas de gases de proteção. Os resultados evidenciaram que as propriedades mecânicas podem ser alteradas ao longo da construção da peça, devido à alteração da concentração de nitrogênio na atmosfera. Diversas aplicações são apresentadas por Hofmann *et al.* (2014), conforme pode ser observado na Figura 4: (a) - (e) são apresentados protótipos de bico-foguete, desenvolvidos com material gradiente de Ti-6Al-4V para Nb puro; (f) - (j) apresentam hastes de válvula automotiva, fabricadas por material gradiente da superliga Inconel 625 para o aço inoxidável 304L; (k) - (n) apresentam um espelho com ligas gradientes que transitam do aço inoxidável 304L para o Invar 36; (o) exibe uma liga gradiente de 304L para o Invar 36 sem pós-processamento, apresentando a diferença da superfície (pela formação de óxido); (p) apresenta a superfície exibida em (o) após fresamento e soldada numa chapa de 304L, mostrando a soldabilidade da liga gradiente; (q) - (t) apresenta uma liga de gradiente que transita de Ti-6Al-4V para 304L, exibindo alguns defeitos encontrados, como fraturas e fases intermetálicas; (u) - (v) exibem um compósito com matriz metálica¹¹, fabricado por MA com liga gradiente de Ti-6Al-4V e TiC.

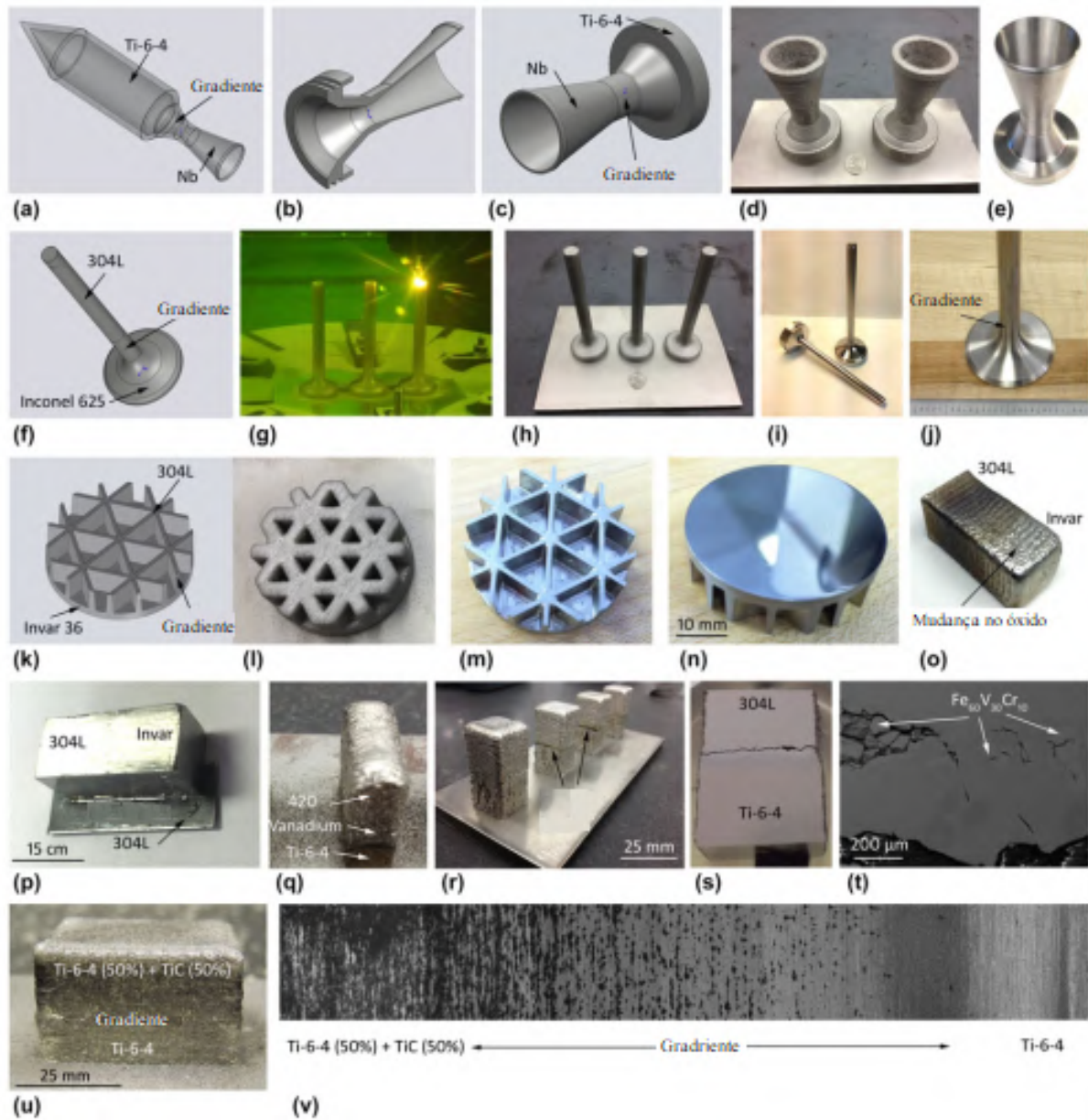
No sentido da atual revolução industrial, a Indústria 4.0 incentiva a integração de sistemas de produção inteligentes e avanços nas tecnologias de informação, onde a MA possui um papel fundamental nesse movimento, estimulando principalmente a criação de novos materiais e processos (DILBEROGLU *et al.*, 2017). Nesta nova era de possibilidades, o avanço na ciência dos materiais possibilita a criação de novos materiais/produtos, fazendo com que os materiais feitos por impressão 3D ganhem outra dimensão, denominados impressão 4D (vide Figura 5), sendo adicionadas duas outras categorias às peças feitas por MA, sendo elas estruturas mórficas (ou adaptativas) e materiais inteligentes.

⁹ A técnica é denominada de *Functionally Graded Additive Manufacturing* (FGAM) (LOH *et al.*, 2018).

¹⁰ Desde o desenvolvimento dos FGMs próximo do ano de 1990, o uso prático desses materiais era limitado (SARATHCHANDRA; S.; VENKAIAH, 2018). A utilização dos processos de manufatura para esses tipos de materiais avançados ganhou diversas outras aplicações, impulsionando sua pesquisa na área acadêmica e utilização na indústria.

¹¹ Do inglês, *metal matrix composites* (MMCs).

Figura 4 – Exemplos de materiais gradientes feitos por MA.

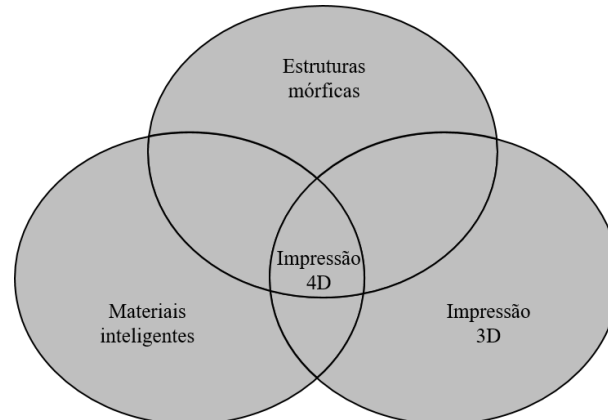


Fonte: Hofmann *et al.* (2014).

De acordo com Ntounoglou, Stavropoulos e Mourtzis (2018), na classe de estruturas mórnicas, exemplos de aplicação da indústria aeronáutica feitos por MA, são asas adaptativas (se adaptam às condições externas sem prejudicar a estabilidade e segurança). Na classe de materiais inteligentes, é necessário categorizar os estímulos de entrada e as respostas de saída (por exemplo, materiais piezoelétricos relacionam deformação com campo elétrico, materiais magnetostrictivos relacionam campo magnético e deformação, materiais piroelétricos relacionam diferença de temperatura com campo elétrico; entre outros), pois esses materiais mudam de forma de acordo com estímulos do meio.

Zhou *et al.* (2015) discutem 4 principais abordagens genéricas para obter a impressão 4D, sendo elas: 1) elementos de automontagem (ou autointegração) - uma potencial aplicação desse

Figura 5 – As 3 principais tecnologias que constituem a impressão 4D.



Fonte: adaptado de [Ntouanoglou, Stavropoulos e Mourtzis \(2018\)](#).

conceito é a utilização de pequenos componentes feitos por MA inseridos no corpo humano por meio de um orifício e sendo eles montados na posição adequada para a operação cirúrgica, minimizando danos de uma cirurgia invasiva; 2) incompatibilidade de deformação (pode ser causada por diferenças no coeficiente de expansão térmica no material), a possibilidade de criação de multimateriais e materiais gradientes possibilita que também seja criado um campo de estímulo definido e/ou gradiente para determinada aplicação); 3) biestabilidade - uma estrutura é considerada biestável quando não possui nenhum grau de liberdade e pode possuir duas, ou mais, posições estáveis, e a estrutura é capaz de alternar de uma posição para outra, por meio de determinada aplicação de carga. Exemplos são: a possibilidade de eliminar o problema de atrito dos pinos para obter melhor precisão nas duas posições e fabricação por MA de asas adaptativas de uma aeronave; e 4) efeito de memória de forma (EMF) - (o material pode retornar ao formato anterior após aquecimento), muitos materiais poliméricos (até ligas metálicas) fabricados por MA possuem esse efeito.

[Jared et al. \(2017\)](#) destacam que a MA oferece oportunidades de fabricação de materiais arquitetônicos, modificação da microestrutura (consequentemente suas propriedades) e materiais multifuncionais. Todavia, ressaltam que ainda existem desafios a serem superados, tais como: rugosidade, precisão dimensional, tensões residuais, distorções térmicas, produtividade, repetibilidade e confiabilidade (pois há variabilidade significativa nas propriedades mecânicas). Esses mesmos desafios foram evidenciados por [Mahamood et al. \(2014\)](#). [Jared et al. \(2017\)](#) ressaltam que o pós-processamento pode ser utilizado para superar algumas dessas lacunas tecnológicas e, por isso, a necessidade de pesquisa nessa área.

Dado o pressuposto, diversas classes de materiais de engenharia vêm sendo aplicadas na MA, gerando novas possibilidades de pesquisa e aplicação e podendo resultar em produtos com uma efetividade mais elevada. Todavia, devido às questões tecnológicas, econômicas, sociais e/ou ambientais, o número ainda é restrito quando comparado aos métodos de MC. Além disso, o modo como a matéria-prima é processada, também influencia diretamente na qualidade do produto final, o que será discutido a seguir.

2.2.1.1 Matérias-primas

Vale ressaltar que todas as peças produzidas por MA são fabricadas a partir da matéria-prima do material, que pode ser encontrada de forma sólida (pó¹², fio/arame ou chapa¹³) ou líquida (no caso de processos que utilizem o princípio de polimerização) (TOFAIL *et al.*, 2018). A escolha de qual tipo de alimentação a ser utilizada depende do processo utilizado e aplicação requerida, cada qual com suas vantagens e limitações.

Comparando-se o fio e o pó como matérias-primas para a MA, segundo DebRoy *et al.* (2018), o fio possui maior abundância comercial e menor preço quando comparado ao pó, além de permitir uma maior taxa de deposição. Como resultado, os processos baseados em alimentação por fio são mais econômicos e mais produtivos, sendo especialmente adequados para fabricação de grandes componentes¹⁴, quando comparados aos processos que utilizam pó como matéria-prima (adequados para componentes menores e mais complexos). No entanto, os autores ressaltam que a economia gerada no processo é compensada pela necessidade de pós-processamento, pois a qualidade superficial da peça feita por fio é pior quando comparada àquela feita por pó.

Em relação ao manuseio e armazenamento e ao tripé da sustentabilidade (econômico, ambiental e social), a alimentação por fio é preferível quando comparada ao pó (DEBROY *et al.*, 2018). Todavia, pesquisas desenvolvidas para avaliar o reuso e reciclagem do pó já depositado concluíram que esse procedimento pode diminuir o desperdício e conseqüentemente contribuir para uma maior eficiência ambiental do processo. Porém, existe uma ressalva quanto à qualidade (em termos de propriedade físico-mecânicas) de componentes manufaturados por pós já utilizados. Nesse sentido, Saboori *et al.* (2019) avaliaram peças de AISI 316L feitas por DED, utilizando pós novos e reciclados (pós coletados após a deposição) e concluíram que os componentes apresentaram comportamentos mecânicos diferentes, sendo que as peças feitas com pó reutilizado apresentaram cerca de 50% menos alongamento, resultando em menor ductilidade quando comparado à peça depositada com pós novos. Utilizando esse mesmo material e técnica de deposição, o estudo de Terrassa *et al.* (2018) mostrou que após 9 ciclos de reutilização do pó (o pó já depositado era coletado, peneirado e adicionado novamente ao *hooper*), a média de redução de alongamento dos componentes depositados foi de 20% e variação de densidade entre eles foi de 0,27%. Os autores concluíram que as propriedades microestruturais e físicas das peças não mudaram significativamente ao longo dos ciclos de reutilização do pó. Nessa perspectiva, maiores estudos são requeridos para avaliar a melhor estratégia de reutilização do pó (proporção de mistura do pó novo ao já utilizado e limite de vezes que esse processo pode ser reiterado) e qual impacto deste no componente depositado.

Em relação ao desperdício de matéria-prima, Gibson, Rosen e Stucker (2015) ressaltam

¹² Harun *et al.* (2018) descrevem o surgimento das tecnologias de MA com pós metálicos em biomateriais, dentre eles o aço inoxidável 316L, e destaca possíveis aplicações na indústria biomédica.

¹³ Utilizado no processo de *Sheet Lamination* (SL).

¹⁴ Com geometrias mais simples (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

que a eficiência de captura (razão da quantidade de matéria-prima fornecida e depositada) de processos por fio é maior (próximo de 100% - retirando os respingos na poça de fusão) àqueles feitos por pó. No trabalho de Lin (2000), essa eficiência de captura do pó variou entre 17-37% para diferentes tipos de bicos coaxiais no DED. Ainda em relação a esse processo, no trabalho mais recente de Sreekanth *et al.* (2020), essa eficiência variou aproximadamente entre 65 e 85%. Tais resultados mostram que houve desenvolvimento na tecnologia e atualmente consegue-se realizar um processo mais eficiente.

Gibson, Rosen e Stucker (2015) citam que as peças feitas pelos processos de DED com alimentação por fio possuem menor quantidade de poros quando comparadas àquelas feitas por pó, porém a precisão dimensional é sacrificada. Os autores sugerem que a seleção de um processo por fio ou pó deve ser cuidadosamente feita de acordo com a aplicação: se a qualidade superficial for crítica (e não for possível a utilização de pós-processamento) é preferível optar pela alimentação por pó; caso seja prioritário o uso de uma peça com menor quantidade de poros, a alimentação por fio é a melhor opção.

Devido à natureza tecnológica de fabricação do próprio fio (obtido por trefilação) existe uma limitação de forma (tamanho e formato), que também limita a precisão e geometria da peça feita por este tipo de alimentação na MA. Já o pó, que é feito por outros processos de fabricação (conforme apresentado na Tabela 10), possui outras características intrínsecas que influenciam na qualidade das peças feitas por MA. Sames *et al.* (2016) e Dutta, Babu e Jared (2019) citam que além da forma/morfologia da superfície¹⁵, o tamanho e distribuição do tamanho das partículas¹⁶, composição química, contaminação, fluidez, porosidade interna e condições ambientais (como umidade) são outros fatores. Nesse sentido, vários aspectos (como características físicas, elétricas, óticas, químicas e mecânicas) afetam a habilidade de uma determinada matéria-prima em ser depositada com sucesso. Portanto, DebRoy *et al.* (2018) definiram a imprimibilidade como um termo na área de MA que classifica a capacidade de uma matéria-prima ser depositada com sucesso (pode-se fazer uma analogia ao termo soldabilidade na área de soldagem).

Vallabani *et al.* (2022) investigaram possíveis efeitos associados à saúde induzidos pela inalação de partículas condensadas/respingos formados e coletados após a deposição por SLM em diversos pós metálicos (10-60 μm), incluindo o aço inoxidável 316L (além de uma superliga à base de níquel-cromo (IN939), uma liga à base de níquel (Hastelloy X, HX), um aço maraging de alta resistência (18Ni300) e uma liga de titânio (Ti-6Al-4V)). Os níveis de toxicidade foram investigados por citotoxicidade, geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), genotoxicidade (formação de cometa e micronúcleo) e resposta inflamatória (perfil de citocina/quimocina) após exposição de células epiteliais brônquicas humanas (HBEC3-kt) ou monócitos/macrófagos (THP-1). Todos os pós exibiram baixa toxicidade aguda (não apresentaram citotoxicidade ou apresentaram

¹⁵ Podendo ser acicular, floco, granular, irregular, agulha, nodular, plaquetário e esférico (DUTTA; BABU; JARED, 2019).

¹⁶ Tipicamente, o processo de DED usa partículas de pó com tamanho entre 45-150 μm (DUTTA; BABU; JARED, 2019).

níveis menores que as doses testadas). Dessa forma, os pós testados não apresentam danos à saúde humana.

Por fim, conforme já discutido anteriormente, o número de materiais disponível para MA ainda é baixo quando comparada aos meios tradicionais de manufatura. Tal fato tem correlação direta com as matérias-primas e como é feito seu processamento. Desta forma, pesquisas futuras que visam analisar os critérios sobre a dificuldade e limitação sobre a deposição dos materiais, e o entendimento sobre as propriedades mecânicas dos materiais fabricados por MA, bem como seus defeitos usuais e como solucioná-los, são fundamentais para aumentar a aplicabilidade das tecnologias aditivas.

Tabela 10 – Características do pó por processo de fabricação.

Processo de manufatura	Tamanho da partícula (μm)	Vantagens	Desvantagens	Aplicação
Atomização a água	0-500	Alto rendimento, elevada gama de tamanhos de partículas, requer apenas matéria-prima na forma de lingote	Necessário pós-processamento para remoção da água, morfologia irregular da partícula, presença de satélites, grande DTP**, baixo rendimento de pó entre 20-150 μm	Todos os metais, como aços, aços inox, ligas de níquel, ligas de cobre, etc Aços (300 Maraging, 4140, 4340, H13, P20, P21, A11), aço inoxidável (316L, 304L, 309L, 17-4PH, 15-5PH), ligas de níquel (In625, In718, Hastelloy X, Hastelloy 276, Wasp alloy), ligas de cobalto (Co-Cr-Mo, Stellite 6, Stellite 21), ligas de titânio (CP Ti, Ti-6Al-4V), ligas de alumínio (A356, Al10SiMg, 6061Al, Scalmalloy), ligas de cobre (bronze, Cu-Ni, GRcop84, C18150)
Atomização a gás	0-500	Grande variedade de ligas disponíveis, adequado para ligas reativas, requer apenas matéria-prima na forma de lingote, alto rendimento, elevada gama de tamanhos de partículas, o uso de AGIE*** permite que pós reativos sejam processados, partículas esféricas	Presença de satélites, elevada DTP**, baixo rendimento de pó entre 20-150 μm	Ligas de titânio (CP Ti, Ti-6Al-4V) (Ti-6Al-4V é o mais comum) Ligas de titânio (CP Ti, Ti-6Al-4V), ligas de níquel (In625, In718), aço inox (17-4PH, 15-5PH), ligas de cobre (Cu-Ni, GRcop84, C18150), exóticos
Atomização por plasma	0-200	Partículas extremamente esféricas	Requer que a matéria-prima seja em arame ou em pó, alto custo	Pastas de solda, Zinco de baterias alcalinas, Ti e granalha de aço
APERP*	0-100	Pós de alta pureza, altamente esférico	Baixa produtividade, alto custo	
Atomização por centrifugação	0-600	Grande variedade de tamanhos de partículas com DTP** estreita	Difícil de fazer pó extremamente fino, a menos que uma velocidade elevada possa ser alcançada	

*Atomização por processo de eletrodo rotativo de plasma (APERP). **Distribuição do tamanho das partículas (DTP). ***Atomização de gás de indução de eletrodo (AGIE).

Fonte: adaptado de Dawes, Bowerman e Trepleton (2015) e Dutta, Babu e Jared (2019).

2.2.2 Metrologia

Na perspectiva da metrologia para materiais manufaturados via MA, [Townsend et al. \(2016\)](#) e [Leach et al. \(2019\)](#) desenvolveram artigos de revisão sobre a metrologia de materiais metálicos feitos por MA, discutindo as principais tecnologias de medição de superfície (internas e externas) e caracterização da textura da superfície, podendo ser aplicadas em tempo real (durante a deposição, *in-situ*) e/ou após a deposição (*ex-situ*), de modo a garantir a qualidade da peça. [Tofail et al. \(2018\)](#) listam uma série de questões associadas à MA e sugere quais técnicas potenciais de metrologia possam ser utilizadas para verificação da propriedade em interesse, conforme Tabela 11.

Associado à metrologia, estão as normas. [Seifi et al. \(2017\)](#) resumiram os padrões e normas associados à qualificação e certificação de materiais metálicos fabricados por MA. [Monzón et al. \(2014\)](#) analisaram normas da ASTM e da ISO¹⁷ relacionadas à MA e discutem os desafios de normas futuras e como a falta delas impacta na adoção de novos materiais, processos e equipamentos, qualificação e certificação, e modelagem e simulação na área. Os autores ressaltam que a dificuldade de previsibilidade na qualidade final de peças fabricadas por essas tecnologias era considerada de alta prioridade e que deveriam ser abordadas em normas futuras.

Para aumentar a confiabilidade dos materiais da MA é necessário intensificar a prevenção de defeitos, assim como elevar a capacidade de testes (não destrutivos e destrutivos) para detectá-los melhor (sejam eles *in-situ* e/ou *ex-situ*). Relacionado à essa prevenção de defeitos, o monitoramento e controle do processo são fundamentais.

Nesse sentido, [Koester et al. \(2019\)](#) avaliaram os ensaios não destrutivos (END) disponíveis para analisar a qualidade dos materiais metálicos feitos por MA, além dos processos de monitoramento mais utilizados. Os autores relataram que devido às limitações das técnicas de inspeção na superfície, a depender da resolução e localização dos defeitos, outras técnicas estão sendo utilizadas para caracterização e inspeção da peça, conforme observado na Figura 6.

[Seifi et al. \(2017\)](#) relatam que os desafios associados aos ENDs¹⁸ não estão relacionados apenas com a variação das propriedades da peça, mas também pela complexidade da peça, rugosidade e o acesso à superfície ou volume de inspeção. Em relação aos ensaios destrutivos (tração, compressão, fadiga, etc), devido à natureza singular dos processos de MA, os autores ressaltam que as elevadas taxas de resfriamento e histórico térmico da peça, possuem vínculo direto com o processo-estrutura-propriedade-desempenho, são diretamente afetados pelos parâmetros de deposição. Uma possível solução seria o desenvolvimento de máquinas de plataforma aberta, denominadas de *open source*, para que os usuários possam compartilhar informações, como parâmetros otimizados de deposição, mesmo que não esteja claro para os autores qual seria esse

¹⁷ Desde de 2013, ambas as sociedades definiram um objetivo em comum de produzir normas relacionadas à este tema (ISO; ASTM, 2013)

¹⁸ [Everton et al. \(2016\)](#) ressaltam que os ENDs são utilizados de modo *ex-situ* e um desafio a ser alcançado é a integração destes no processo em tempo real (*in-situ*).

Tabela 11 – Técnicas de metrologia adequadas para MA.

Fator	Propriedade específica de interesse	Abordagem metrológica	Técnica de metrologia específica/potencial
Preparação/modificação de matéria-prima sólida (pó, arame, folha) ou líquida			
Química de superfície, química de ligação, enchimento, adesivo e fluxos	Elementar	Off-line/At line	XPS, AAS, UV-Vis, IR, EDX
	Molecular, ligação		XPS, ToF-SIMS, Raman, FTIR, SFG
	Energia de superfície		CA
Molhabilidade	Rugosidade		AFM, Perfilometria
Acabamento superficial	Textura		XRD, EM, LM, PM
Anisotropia			
Monitoramento da construção da peça			
Forma, tamanho e volume de construção	Dimensões		Metrologia (com e sem contato)
Química de superfície	Molecular, ligação	On-line/In-Line	Raman, FTIR, SFG
Macroestrutura e porosidade	Tamanho da gota/poça de fusão		IR-T, LM, PM, EM
Microestrutura	Grãos, contornos de grãos, rachaduras e defeitos	On-line/In-Line/At line/Off-line	IR-M, Raman, PM, LM, EM, Raman, FTIR, IRM, SFG
Gerenciamento térmico	Distribuição e dispersão de calor, estresse térmico	On-line/In-Line	IR-T
Pós-processamento			
Térmico	Tensões internas		XRD
Trabalho a quente e frio	Grãos, contornos de grãos, rachaduras e defeitos, incluindo deslocamentos	Off-line	EM, LM, PM
Tratamento térmico	Alívio de tensão, refinamento de grãos		XRD, EM, LM, PM
Acabamento superficial	Rugosidade		AFM, Perfilometria

Abreviações*: XPS: *X-ray Photoelectron Spectroscopy*; AAS: *Atomic Absorption Spectroscopy*; UV-Vis: *Ultraviolet-Visible Light Absorption Spectroscopy*; IR: *Infra-Red*; EDX: *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*; ToF-SIMS: *Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy*; Raman: *Raman Spectroscopy*; FTIR: *Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy*; SFG: *Sum Frequency Generation Spectro/Microscopy*; CA: *Contact Angle measurements*; AFM: *Atomic Force Microscopy*; XRD: *X-ray Diffraction*; EM: *Electron Microscopy*; LM: *Visible Light Microscopy*; PM: *Polarization Microscopy*; IR-T: *Infra-Red Thermography*; IR-M: *Infra-Red Microscopy*.

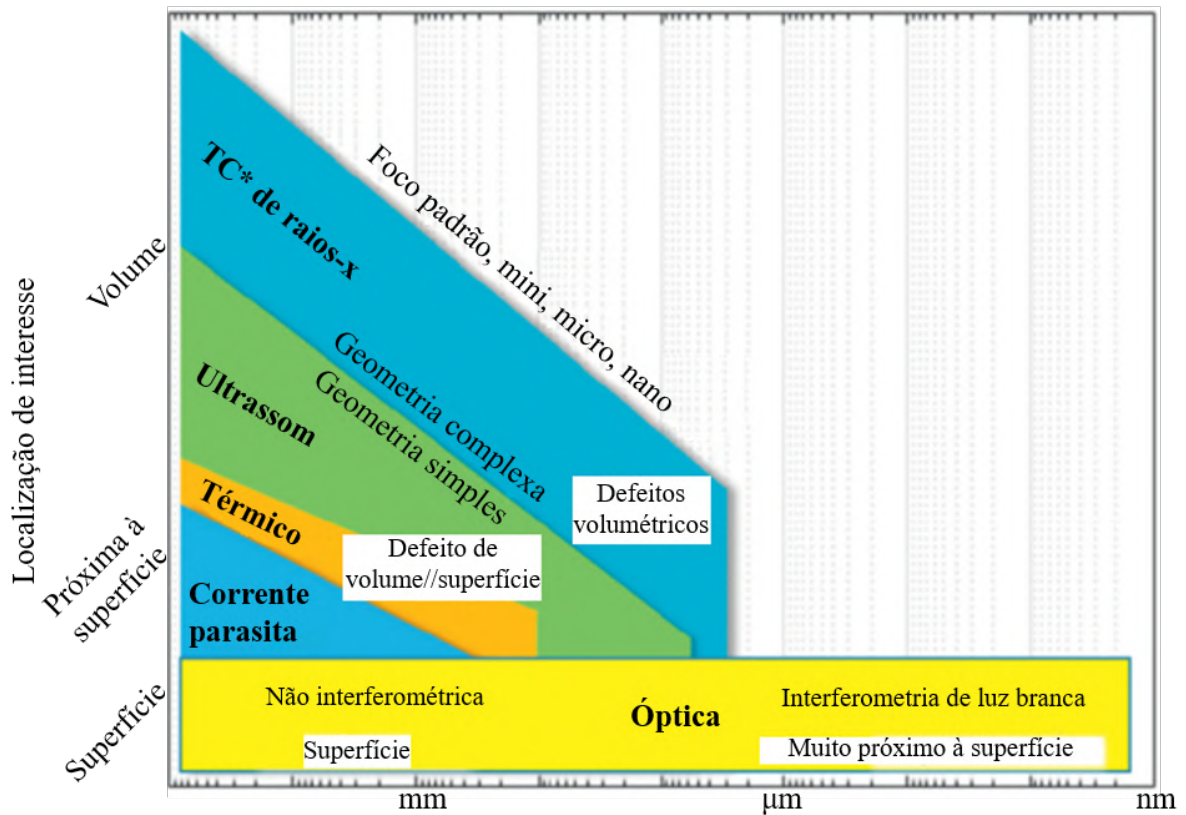
*As abreviações foram mantidas em inglês para não ocorrer alteração no sentido da sigla para o português.

Fonte: adaptado de [Tofail et al. \(2018\)](#).

impacto no produto e a relação entre os componentes feitos para os testes e os componentes reais.

No tocante ao monitoramento e controle, [Everton et al. \(2016\)](#) elaboraram um artigo de revisão sobre as técnicas disponíveis para inspeção *in-situ* do PBF e DED em materiais metálicos, além de discutir os ENDS mais utilizados. No artigo de revisão de [Tapia e Elwany \(2014\)](#), foram analisadas além das técnicas de monitoramento, as técnicas de controle para estes processos, com foco na deposição de materiais.

Figura 6 – Mapa de cobertura de resolução para várias técnicas de END com aplicabilidade a MA para defeitos geométricos.



*Tomografia Computadorizada.

Fonte: adaptado de ISO e ASTM (2013).

Por fim, vale ressaltar que em relação às normas, ainda carece de padrões para categorizar, classificar e padronizar toda a cadeia de produtos feitos por MA, abordando desde matéria-prima, processo, pós-processamento e o impacto final da utilização de peças. Todavia, observa-se uma preocupação da indústria, academia e órgãos reguladores para solucionar tais desafios, buscando incorporar técnicas (*in-situ* e *ex-situ*) de inspeção, monitoramento e controle para aumentar a confiabilidade das peças.

2.2.3 Mercado

Em relação às perspectivas e tendências dos processos de MA, a partir do início de 1980, iniciou-se uma valorização do mercado, com a visualização de possibilidades de criação de novos produtos e processos, e, segundo Thompson *et al.* (2016), o valor de mercado em termos de serviço, sistemas, softwares e materiais era de US\$ 4 bilhões, em 2014. De acordo com último relatório da empresa Hub (2020), baseado em dados dos relatórios da Wohlers Associate¹⁹, EY Reporting²⁰ e SmarTech Publishing²¹, o último dado histórico real do mercado de MA

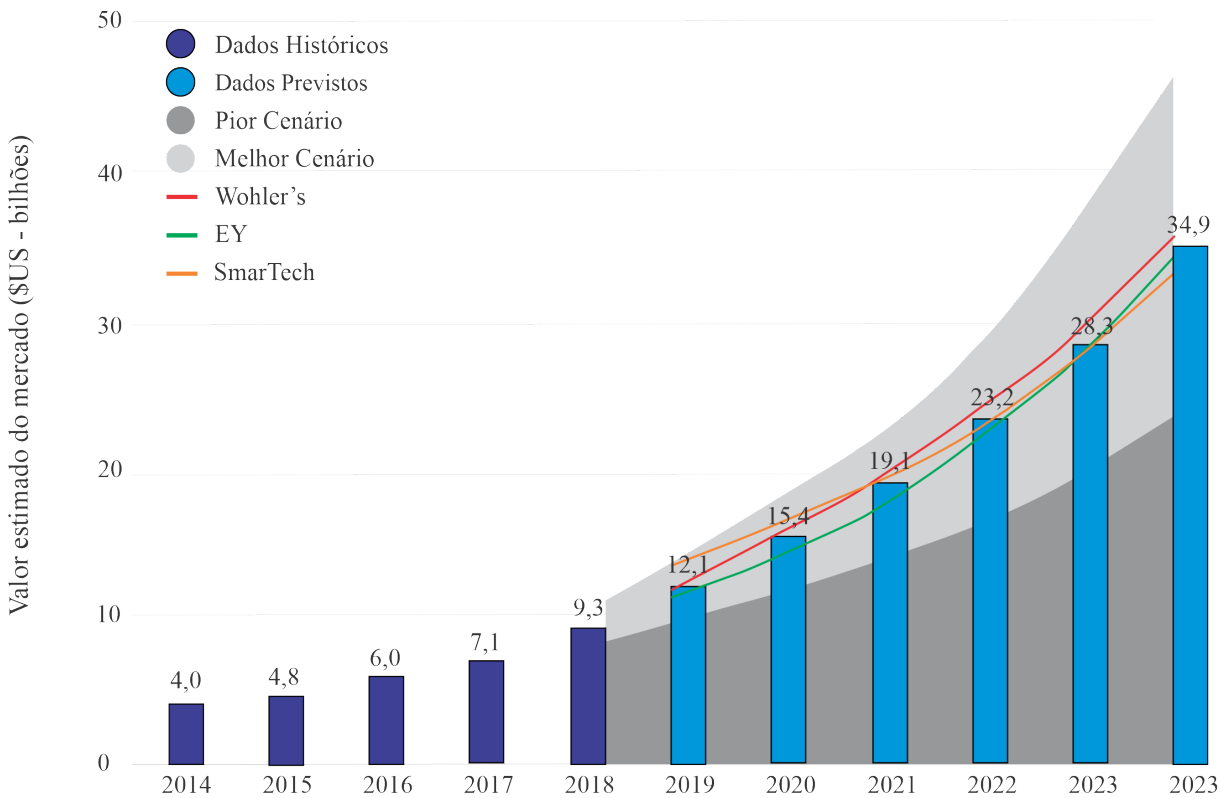
¹⁹ Disponível em: wohlersassociates.com.

²⁰ Disponível em: ey.com.

²¹ Disponível em: smartechnalysis.com.

demonstrou que em 2018 valia US\$ 9,3 bilhões (valorização de 44% em 4 anos), com previsão de chegar em 2024 ao valor de US\$ 39,4 bilhões (ver Figura 7), e dobrando de tamanho a cada 3 anos²². Contudo, o relatório Hub (2020) ressalta que fatores externos podem minimizar ou maximizar a taxa de crescimento, resultando em mercado abaixo de US\$ 24 bilhões ou acima de US\$ 45 bilhões. Nesse sentido, podem-se citar alterações no clima, pandemia da COVID-19, demanda de consumo, evolução de tecnologias, dentre outros fatores. Vale destacar a incerteza de como o mercado (tanto do ponto de vista dos clientes como da indústria) comportar-se-á no mundo pós-pandemia. Mas, tendo em vista como a humanidade já enfrentou várias pandemias ao longo da história, é possível prever que o mercado irá retornar aos valores anteriores e, com o tempo, compensar a perda de receita do período anormal.

Figura 7 – Previsão do mercado de MA.



Fonte: adaptado de Hub (2020).

Desde o surgimento da MA, já se discutia o potencial disruptivo desse tema e, atualmente, ainda estamos vivendo essa mudança, porém com maior conhecimento adquirido. Todavia, alguns desafios e limitações ainda precisam ser estudados (e talvez superados) e, para que ocorra uma consolidação e expansão das tecnologias nas indústrias (atuais e futuras), pesquisas são requeridas para melhorar o conhecimento sobre os processos e materiais, de modo a aumentar a aplicação dessas tecnologias em produtos e processos factíveis para a sociedade.

Segundo ADDISPACE (2017), a MA (componentes metálicos ou não) tem impacto

²² De acordo com Thompson *et al.* (2016), a evolução da MA nas últimas três décadas tem sido nada menos que extraordinária.

positivo na manufatura sustentável (nos três critérios - econômicos, ambientais e sociais), cujos principais benefícios são: rápida adaptação às exigências do mercado (por meio de *benchmarking* pode-se modificar um determinado produto em um menor espaço de tempo); personalização do produto, possibilidade de criação de geometria complexa²³; economia de material; redução de custo e tempo; dentre outros. Destaca-se que quanto menor for o lote de produção e mais complexa a geometria do componente, maiores são os benefícios da MA em relação aos processos convencionais de manufatura (subtrativa) (FRAZIER, 2014). ADDISPACE (2017) destaca que uma limitação à expansão da MA é o fato de muitos profissionais da manufatura não conhecerem ou não entenderem a capacidade da tecnologia.

A própria natureza tecnológica de fabricação das matérias-primas na MA afeta diretamente a cadeia de produção de um determinado produto, influenciando diretamente o mercado de manufatura. Na Figura 8 é apresentada uma comparação entre os processos de manufatura convencional (MC) e aditiva de uma determinada peça, iniciando da matéria-prima até a peça completada. Observa-se que as etapas de produção são minimizadas de dias (até semanas) para horas, o que impacta em toda uma cadeia de valor do produto e modifica o paradigma da manufatura atual quando da colocação de novos produtos no mercado. Porém, apesar do tempo de produção ser minimizado, existem outros critérios que devem ser tomados em consideração para saber qual via de produção é viável, a depender do tipo de material, geometria, propriedades mecânicas, aplicação e custo. Além disso, devido às limitações dos processos aditivos, pode ser necessários a utilização de etapas de pós-processamento realizadas por processos de usinagem (convencional ou não-convencional), para que a peça final tenha tolerâncias dimensionais compatíveis com a aplicação, o que também impacta na cadeia de produção. Dessa forma, para o lançamento de um produto no mercado, é necessário avaliar de, forma holística, todas as etapas de fabricação. Por fim, conforme ressaltado por ADDISPACE (2017), a MA não irá substituir os processos tradicionais de fabricação; porém, por possuir um caráter de inovação tem potencial para complementá-los. Deste modo, os processos tradicionais de fabricação mecânica podem ser utilizados como uma etapa de pós-processamento nos metais fabricados por MA, visando melhorar a qualidade superficial e precisão dimensional destes (MAHMOOD *et al.*, 2022). Na Tabela 12 é apresentada uma comparação entre os fatores que favorecem a MA e quais são a favor da MC.

Os meios de produção e o mercado vêm sendo modificados com a introdução das técnicas de MA. Nesse sentido, Eyers e Potter (2017) avaliaram a perspectiva da indústria através de 14 estudos de casos, em quatro empresas de MA consolidadas no mercado (todas atuando há mais de 15 anos). O conceito de um sistema industrial de MA necessita avaliar as demandas, iniciar o desenvolvimento do projeto/produto, elaborar o pré-processamento, realizar a manufatura e o pós-

²³ A MA é capaz de produzir geometrias (até mesmo internas) complexas que podem aumentar a funcionalidade e desempenho do produto, como no caso de dutos de ar e condutas de fiação para robôs, flexões 3D para atuadores integrados e garras universais, vias internas complexas para dispositivos de amortecimento acústico, canais de fluidos otimizados, micro paletas internas para dispositivos cirúrgicos oculares e, o mais estudado, canal de resfriamento conformal (THOMPSON *et al.*, 2016).

Figura 8 – Comparação do processamento via MA e MC.



*Distribuição do tamanho das partículas.

Fonte: adaptado de [Bandyopadhyay e Heer \(2018\)](#).

Tabela 12 – Fatores favoráveis à MA e à MC.

Favorece a MA	Favorece a MC
Baixo volume de produção	Alto volume de produção
Altos custos de material	Baixos custos de material
Alto custo de usinagem	Materiais facilmente usináveis
Investimento de capital	
Custos logísticos	Manufatura centralizada
Prototipagem	

Fonte: adaptado de [Frazier \(2014\)](#).

processamento de modo a elaborar o mesmo que atenda os objetivos, sendo os principais objetivos classificados em: custo, confiabilidade, flexibilidade, qualidade e velocidade de produção. Os autores elaboraram um sistema que permite identificar as oportunidades estratégicas, com base nos problemas e soluções realistas da empresa, para aprimorar fabricações futuras, de modo a aumentar a competitividade da empresa.

Nesse sentido, [Prakash, Nancharaih e Rao \(2018\)](#) relataram que as tecnologias de MA possuem vantagens quando comparadas aos processos de MC nos seguintes itens: eficiência de material, eficiência de recurso, possibilidade de geometria complexa e flexibilidade de produção, conforme detalhado a seguir.

- **Eficiência de material:** a MA permite um menor desperdício de material durante a fabricação da peça, consequentemente oferece um processo menos agressivo ao meio ambiente

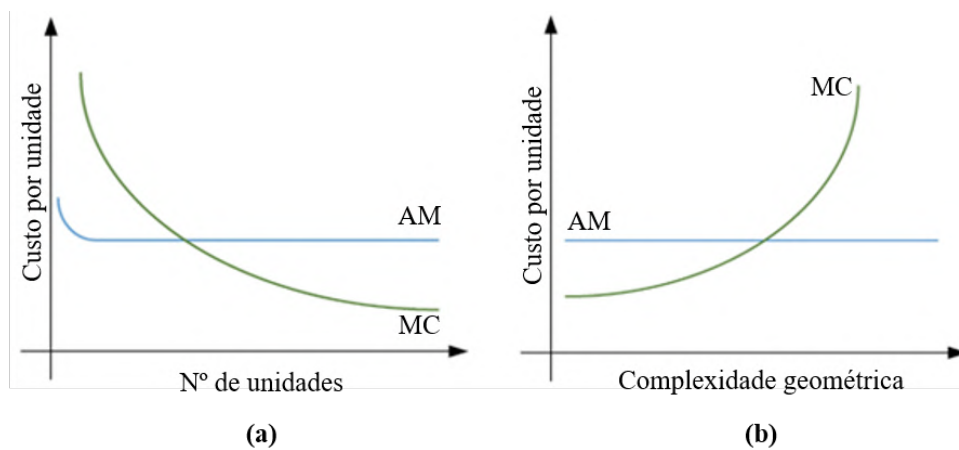
(nesse ponto de vista) que também pode ser economicamente sustentável. Conforme já discutido, os processos de MA com alimentação por fio podem chegar à eficiência próxima de 100%. Na área aeronáutica, esse termo é referido como razão “*buy-to-fly*” que representa, segundo [Singamneni et al. \(2019\)](#), a razão entre a quantidade inicial e final de material, e devido às constantes pressões para redução de desperdício de material, baixas razões tornam-se essenciais. Segundo os autores, a manufatura convencional de componentes aeronáuticos gera peças com uma razão entre 15:1 até 20:1, mostrando a baixa eficiência de material. [Allen \(2006\)](#) avaliou que no caso de flange de dutos aeronáuticos de titânio produzidos por manufatura convencional, essa razão pode chegar a 20,1:1, em que representa a utilização de um tarugo de 206,6 kg para um produto final de 10,28 kg. O autor concluiu que a MA pode gerar razões de até 2:1, representando uma redução de 10 vezes na massa inicial do tarugo. [Dehoff et al. \(2013\)](#) apresentaram um estudo de caso em que foi possível diminuir de 33:1 (peça forjada e usinada) para 1:1 (peça feita por EBM, com prensagem isostática a quente (do inglês, *hot isostatic pressing* – HIP) e usinada), em um suporte de detector de vazamento de ar, feito de Ti-6Al-4V, reduzindo 50% do custo de fabricação.

- **Eficiência de recurso:** muitas vezes, na MC é necessária a utilização de recursos auxiliares, tais como: moldes, incertos de corte, pinças, mandris, dispositivos de fixação, fluidos de corte, entre outros. Por outro lado, os processos de MA não necessitam desses recursos adicionais ou quando são necessários, o número é menor quando comparado aos processos tradicionais. Dessa forma, conforme ressaltado por [Prakash, Nancharaih e Rao \(2018\)](#), isso representa uma oportunidade de melhora na dinâmica da cadeia de produção de um determinado produto. Nesse sentido, [Conner et al. \(2014\)](#) destacam que essa característica da MA permite reduzir os custos e tempo (origem do tempo “prototipagem rápida”) associados à produção.
- **Geometria complexa:** essa característica é uma das mais atrativas da MA quando comparada à manufatura convencional, pois devido à natureza tecnológica de adição de camadas para construção da peça pode-se construir peças com geometria complexa²⁴ (com ou sem materiais de suporte, a depender do design e tecnologia de impressão), permitindo a redução de massa, customização, incorporações de funções (como no caso de canal de resfriamento conformal) em um determinado componente, entre outras finalidades. Nesse sentido, [Conner et al. \(2014\)](#) ressaltam que complexidade e customização estão intimamente ligados ao volume de produção e inerentemente ligado ao custo, quanto maior é o nível de complexidade e/ou customização, menor é o volume de produção, mais vantajosa a MA se torna quando comparada à MC. Na Figura 9 é apresentado um gráfico qualitativo comparativo do impacto do volume de produção e complexidade/customização sobre o

²⁴ Deve ser realizado uma otimização topológica do design para maximizar as funcionalidades desejadas e minimizar àquelas indesejadas ([BUSACHI et al., 2017](#)).

custo por peça, para as tecnologias de MA e MC. Para um volume de produção inferior ao ponto de equilíbrio, a MA é vantajosa. Para níveis de complexidade/customização acima do ponto de equilíbrio, é mais vantajoso fabricar peças por MA. Além disso, vale ressaltar que existem algumas limitações. Segundo [Jared et al. \(2017\)](#), o mantra sobre a complexidade geométrica da peça feita por MA ser livre não é válido, devido às restrições tecnológicas associadas à cada tecnologia, material, geometria, entre outros.

Figura 9 – Comparação entre o custo por peça utilizando MA e MC em relação ao (a) número de peça e (b) complexidade geométrica.



Fonte: adaptado de [Busachi et al. \(2017\)](#).

- **Flexibilidade de produção:** após a análise dos atributos da peça, a produção pode ser sincronizada com a demanda do produto e a necessidade do cliente, possibilitando a diminuição de estoque e gargalos de produção. Todavia, exige um planejamento da demanda dos suprimentos e das peças, planejamento da produção e contato mais próximo ao cliente²⁵. Além disso, [Eyers e Potter \(2017\)](#) ressaltam que a fabricação flexível exige que todos os componentes do sistema também sejam flexíveis, não apenas os processos individuais da MA, o que impacta em toda cadeia de suprimento de um determinado produto.

Todavia, ainda existem algumas restrições da MA que impactam diretamente no mercado, como na limitação de dimensão²⁶, velocidade de deposição²⁷, imperfeições (heterogeneidade do material e confiabilidade estrutural) e custo²⁸, no qual está intimamente ligado à não escalabilidade ([PRAKASH; NANCHARAIH; RAO, 2018; GAO et al., 2015](#)). Além destas limitações, em

²⁵ Em alguns casos, a MA possibilita uma descentralização da manufatura, pois permite a impressão de peças em locais remotos por distribuidores de serviços locais, minimizando-se assim os custos associados ao transporte ([ATTARAN, 2017](#)).

²⁶ Segundo [Attaran \(2017\)](#), os produtos ficam limitados ao tamanho do volume útil de impressão, que na maioria das máquinas pode não atender aos grandes componentes, sendo uma solução a fabricação isolada de componentes e depois a união, o que requer tempo adicional para montagem, afastando das vantagens do processo.

²⁷ Possíveis soluções seriam múltiplos cabeçotes, bicos maiores (maiores taxas de deposição) e motores de alta velocidade para o cabeçote ([ATTARAN, 2017](#)).

²⁸ No artigo de revisão de [Busachi et al. \(2017\)](#), várias técnicas de modelagem de custo dos produtos da MA foram investigadas. Segundos os autores, a técnica mais proeminente é a Custeio Baseado em Atividades (do inglês,

alguns processos de MA, como no DED, destacam-se as baixas precisões dimensionais, baixa qualidade superficial e/ou incapacidade de gerar texturas superficiais micrométricas (ou nanométricas) para sua funcionalização. Desta forma, os processos de MA não serão concorrentes à MC, mas deverão ser utilizados como complementos de produção, trazendo novas possibilidades de inovação na fabricação que poderá impactar em toda cadeia de produção de um determinado produto, adequando às novas realidades da manufatura atual.

Sendo assim, pode-se concluir que em alguns casos as tecnologias aditivas não são competitivas tecnológica e economicamente quando comparadas às subtrativas, mas em outros apresentam-se como soluções proeminentes inovadoras que possibilitam uma (nova) forma viável para a fabricação de peças, principalmente àquelas complexas e de alto valor agregado. Uma solução seria utilizá-las de forma complementar ou conjunta (conceito é definido como processos híbridos), não de forma isolada. Para aumentar a competitividade das empresas que utilizam tais tecnologias, é necessário primeiramente conhecê-las, o que leva a uma maior quantidade de estudos, diagnósticos, tempo e investimento, podendo ao mesmo tempo gerar publicações e patentes na área.

Um indicador de tendências do mercado são as patentes. Nesse sentido, a [Gridlogics \(2014\)](#) apresentou um relatório detalhado que categorizou e analisou materiais, processos e aplicações da MA em patentes de 1970-2013, utilizando as ferramentas PatSeer²⁹ e Patent iNSIGHT Pro^{TM30}. De acordo com as análises, o número de patentes publicadas nos últimos anos teve um crescimento considerável, mostrando uma tendência de evolução da área, conforme pode ser visto na Figura 10. Dentre as 1661 companhias analisadas (inclui-se empresas, universidades, institutos de pesquisa, entre outros), a 3D Systems foi a empresa com maior número de patentes publicadas (total de 39 – representa 1,39% do total), em segunda colocação ficou a Stratysys (total de 37 – representa 1,32% do total) e em terceiro ficou o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (do inglês, *Massachusetts Institute of Technology* – MIT), com 30 patentes (1,07% do total).

Por fim, vale ressaltar que a expansão do mercado da MA está intimamente ligada com o conhecimento das suas tecnologias por parte dos usuários³¹ (conforme já discutido), podendo ser feita por meio de *workshops*, eventos científicos, congressos, entre outros. Sendo assim, a integração entre academia, governo e indústria e fomento na área são fundamentais para a capilaridade de conhecimento, com o intuito de transformar os produtos feitos por esses processos em possíveis inovações industriais para o mercado.

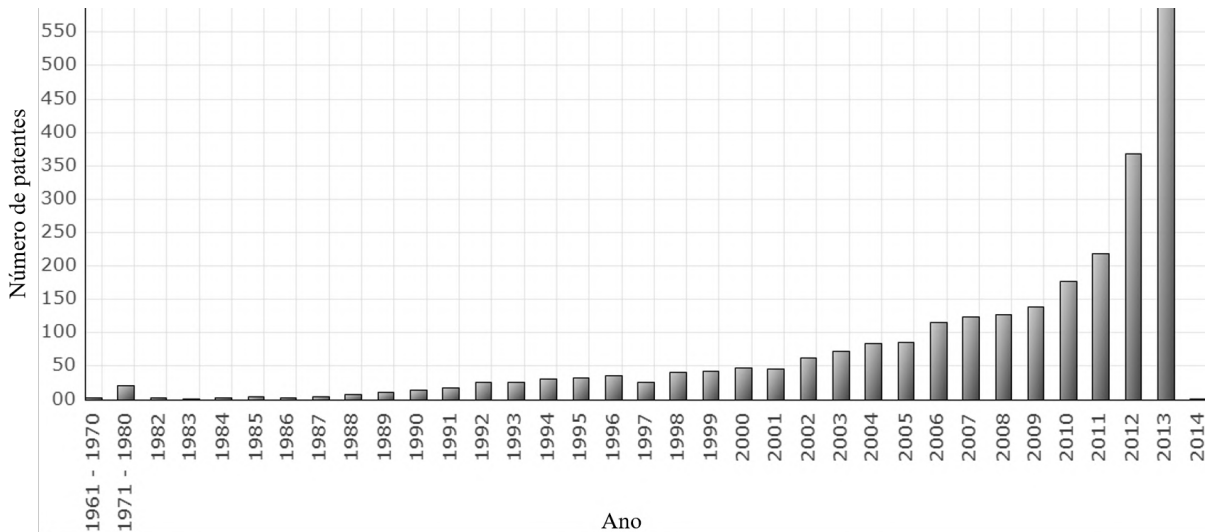
Activity Based Costing - ABC) associada ao mapeamento do processo. Todavia, eles ressaltam que os modelos não incorporam todos os custos “*end-to-end*” do produto, excluindo também as etapas de pós-processamento.

²⁹ Disponível em: patseer.com.

³⁰ Disponível em: patentinsightpro.com.

³¹ [Gao et al. \(2015\)](#) ressaltam a importância da comunidade “*Maker*” nesse contexto.

Figura 10 – Número de patentes de 1961-2014 relacionadas à MA.



Fonte: adaptado de Gridlogics (2014).

2.2.4 Fabricação (e pós-processamento)

A qualidade (ou não) da peça está ligada ao seu projeto e método de fabricação, entre outros critérios. Nesse sentido, Jared *et al.* (2017) identificaram os principais desafios entre a MA e otimização do design³² (topologia) do produto, os quais devem ser observados por um paradigma holístico do projeto, cujos processos aditivos, materiais de MA, otimização do projeto, modelos de processo e material trabalham em sinergia para atender os requisitos de projeto.

Independentemente do processo de fabricação, segundo Kumbhar e Mulay (2016), a limitação de qualidade superficial das peças produzidas por MA advém do Efeito Degrau de Escada (vide Figura 11), intrinsecamente associado ao desvio entre o modelo tridimensional gerado pelo CAD e a peça física construída bidimensionalmente pelas camadas. Tal efeito por ser minimizado por meio de um planejamento do processo que leve em consideração a mudança da orientação da peça, diminuição espessura da camada na peça como um todo (o que resulta em maior tempo de fabricação), fatiamento³³ adaptativo³⁴ – onde, em apenas em locais específicos da peça, ocorre a diminuição da espessura da camada –, necessidade ou não de suporte ou pela utilização de etapas de pós-processamento.

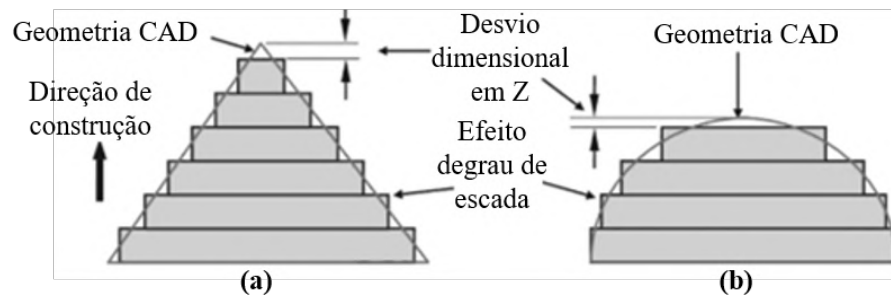
A baixa qualidade superficial e dimensional, além do efeito degrau de escada, segundo Bourell *et al.* (2017), também está associado à geometria das linhas de deposição, baixa precisão

³² Emmelmann, Herzog e Kranz (2017) elaboraram um catálogo que relaciona formas favoráveis e desfavoráveis para construção de peças produzidas pelas tecnologias de AM que utilizam laser como fonte de energia.

³³ Xu *et al.* (2018) apresentam um artigo de revisão sobre os processos de fatiamento para os processos de DED.

³⁴ Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Ding, Dwivedi e Kovacevic (2017), que com base no processo de *Laser-based direct metal deposition* (LBDMD) em um braço robótico com 8 graus de liberdade (6 eixos do robô com mais 2 eixos – rotação e inclinação) para manufaturar uma hélice de aço inoxidável 413 L HC. Segundo os autores, o novo método de fatiamento desenvolvido foi implementado com sucesso para construir a peça. Todavia, apesar da geometria da peça final ter exibido concordância com o modelo CAD, a precisão dimensional e a qualidade superficial da mesma não foi avaliada pelos autores.

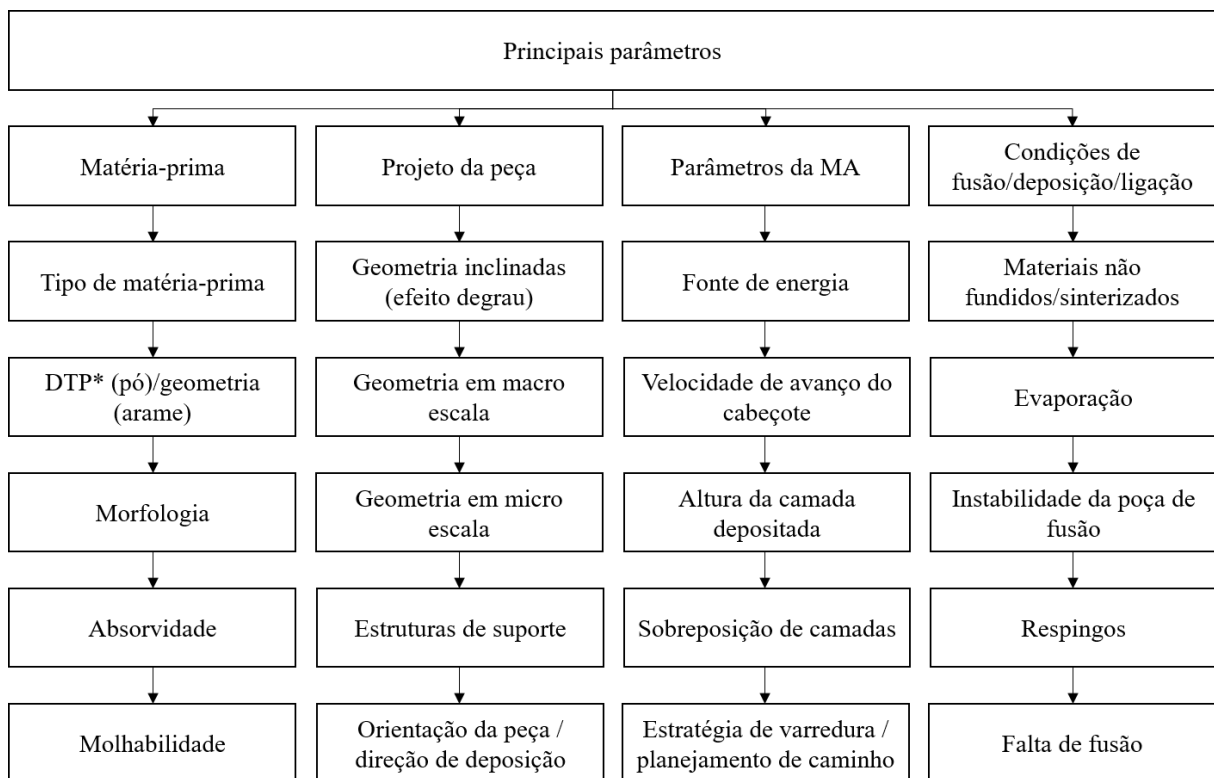
Figura 11 – Efeito degrau de escala em superfícies planas (a) ou não planas (b).



Fonte: Volpato (2017).

do foco do laser, elevada tensão residual, fenômeno de *balling*³⁵, pós semifundidos aderidos à superfície e/ou qualidade da matéria-prima. Na Figura 12 é apresentada os principais parâmetros que afetam a qualidade superficial e dimensional de peças feitas por MA.

Figura 12 – Principais parâmetros que afetam a qualidade superficial e dimensional de peças feitas por MA.



*Distribuição do tamanho das partículas (DTP).

Fonte: adaptado de Maleki *et al.* (2021).

Em termos de tolerâncias dimensionais, classificadas pela norma ISO 286-1, na Tabela 13 é apresentada uma comparação das classes IT para os processos de MA em relação a outras técnicas de MC. Observa-se que os processos de MA se incluem majoritariamente em qualidades de trabalho, relacionados à mecânica grosseira (aceitável para peças que não são acopladas

³⁵ Esse fenômeno foi primeiramente reportado na MA por Bourell *et al.* (1992) e ele ocorre quando o material líquido não adere o substrato adjacente devido à tensão superficial

a outras e não requerem grande precisão), variando entre IT11 e IT16. Comparativamente, as tolerâncias alcançadas pelas peças obtidas em MA assemelham-se àquelas produzidas por fundição e forjamento, mas são inferiores quando comparadas àquelas obtidas por fresamento, torneamento e retificação. [Lieneke et al. \(2015\)](#) ressaltam que existem variações entre as classes IT alcançadas por diferentes métodos de MA e, também, de acordo com a orientação de deposição. Os autores destacam que a depender dos requisitos do projeto, a peça obtida por MA poderá necessitar de etapas subsequentes de usinagem.

Tabela 13 – Classes IT para vários processos de manufatura.

Processo	Classe IT (DIN ISO 286-1)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Fundição												
Sinterização												
Forjamento												
Extrusão												
Fresamento												
Retificação												
MA*												

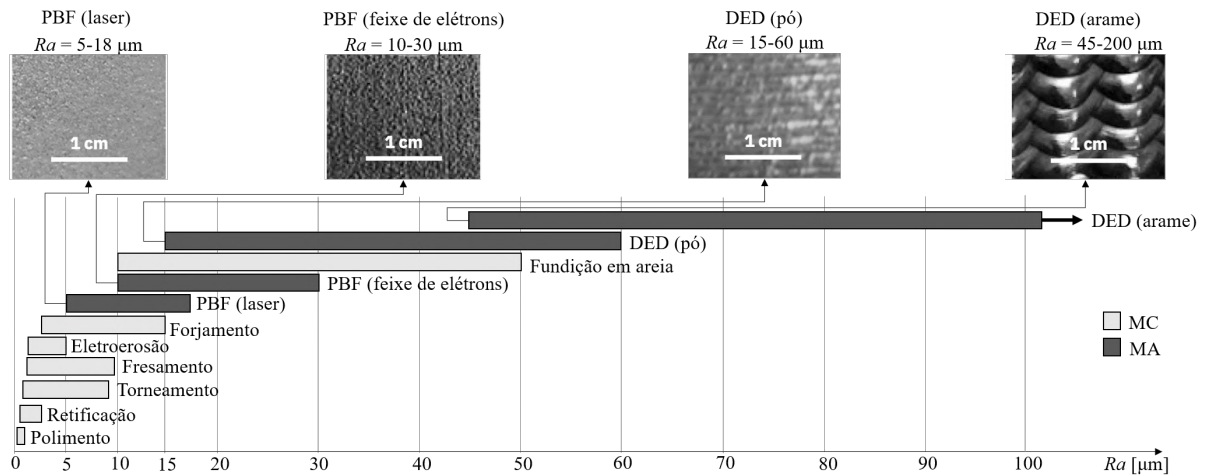
Fonte: adaptado de [Fritz e Schulze \(2010\)](#) e [*Lieneke et al. \(2015\)](#).

Em termos de qualidade superficial, na Figura 13 é apresentada a faixa de rugosidade típica alcançada por diferentes processos de MA e MC. Observa-se que alguns dos processos de MA podem gerar peças com altos valores de rugosidade (R_a de até $200 \mu\text{m}$), podendo impossibilitar, a depender dos critérios de projeto, seu uso sem operações de pós-processamento. Segundo [Huckstepp \(2019\)](#), a escolha do(s) processo(s) subsequente(s) de usinagem deve ser associada a uma análise de toda a cadeia de produção de um determinado componente, levando em consideração tempo, custo e critérios ambientais associados. Os autores ressaltam que a chave para alcançar os objetivos (qualidade dimensional, rugosidade, fabricação sustentável, entre outros) na cadeia de produção de materiais fabricados por MA e otimizá-los é entender todas as dependências envolvidas (e possíveis compensações) em todo o sistema.

[Duleba, Greskovic e Sikora \(2011\)](#) e [Kumbhar e Mulay \(2016\)](#) analisaram diversos métodos de pós-processamento para materiais produzidos por MA, demonstrando a aplicabilidade de diferentes tecnologias (convencionais ou não convencionais) para melhorar a qualidade superficial das peças. Nesse sentido, tanto em termos da limitação dimensional/superficial quanto em comportamentos mecânicos (propriedades/microestruturas) de peças obtidas por MA, o uso de etapas de pós-processamento pode melhorar tais características, de modo a criar peças que atendam aos requisitos de projetos. A cadeia de processo para componentes metálicos fabricados por MA pode envolver as seguintes etapas:

- **Deposição:** normalmente, manufaturado por tecnologias baseadas em DED ou SLM. Nesta primeira etapa, os parâmetros devem ser escolhidos da forma mais adequada possível para

Figura 13 – Rugosidade típica alcançada por vários processos de manufatura.



Fonte: adaptado de Huckstepp (2019)

evitar defeitos internos (por exemplo, porosidade), imperfeições (por exemplo, heterogeneidade de propriedades mecânicas), laminação e outros, mantendo uma produtividade justa. Após a deposição, os desvios geométricos/dimensionais e a rugosidade devem ser mínimos possíveis. Nesse caso, menos tempo de pós-processamento será necessário para melhorar a qualidade da superfície e a precisão dimensional da peça.

- **Usinagem:** para componentes prismáticos, o fresamento é uma opção viável devido à eficiência de correção de erros geométricos/dimensionais com elevada taxa de remoção de material. Em relação às peças cilíndricas, o torneamento é um processo factível.
- **Transformação:** em alguns casos, processos que não envolvem remoção de material são aplicados para fornecer as características desejadas (por exemplo, microestrutura, dureza, propriedades físico-mecânicas, entre outras). Estes podem ser processos mecânicos (por exemplo, *shot peening*), tratamentos à base de laser (por exemplo, polimento a laser) ou tratamentos térmicos (por exemplo, prensagem isostática a quente).
- **Acabamento e acabamento fino:** a retificação pode ser usada como um processo de usinagem final para produzir elevada qualidade superficial (rugosidades em escala nanométrica) e com tolerância dimensional de alta precisão (por exemplo, faixa de tolerância entre IT01-IT03 - 10-50 vezes o valor de R_a). Existe a possibilidade de aplicação da retificação após a deposição. Para tanto, deve-se utilizar um rebolo com alta taxa de remoção para operação de desbaste e outro rebolo para acabamento (fino), o que aumentaria o custo de aquisição de novos rebolos e o tempo de processamento para troca e posicionamento da ferramenta. Polimento químico, eletroquímico, tamboreamento e MAF são algumas operações de pós-processamento que têm sido utilizadas. Processos de acabamento fino podem gerar peças com rugosidade e/ou texturas que variam de escala subnanométrica a

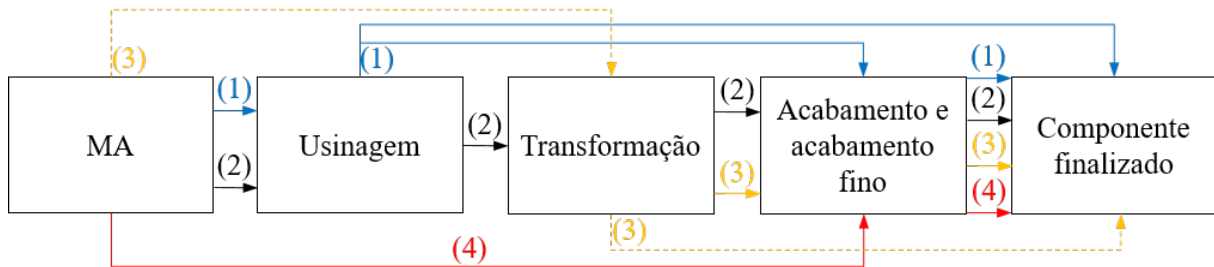
micrométrica e funcionalização da superfície (por exemplo, escoamento de fluido, adesão celular, molhabilidade, resistência à corrosão, entre outros).

Como etapa anterior à deposição, para a MA de metais por DED é necessário iniciar a deposição em cima de um peça denominada de substrato (que deve possuir superfícies paralelas para evitar alteração significativa na distância focal do feixe de laser durante a deposição – o ideal também que ela possua composição química semelhante do componente a ser depositado para que ocorra uma diluição adequada nas primeiras camadas). Caso seja necessário separar a peça depositada do substrato, uma alternativa é a utilização do corte por eletroerosão a fio. Em alguns casos, as primeiras camadas depositadas são removidas como camadas de sacrifício, devido ao gerenciamento energético (energia e taxa de resfriamento das primeiras camadas de material são diferentes das subsequentes). Após essa etapa de separação (ou não) e a deposição ter sido finalizada, a peça pode ser pós-processada.

Devido às particularidades de cada processo e condições utilizadas, cada (pós-)processo entregará a peça com certo grau de rugosidade e tolerâncias geométricas e dimensionais. Várias rotas de fabricação (ver Figura 14 – rotas 1-4) podem ser exploradas para aplicações com componentes fabricados com geometria próxima a final, dependendo da qualidade da peça recebida da AM e das características finais desejadas (por exemplo, rugosidades e propriedades mecânicas). Tradicionalmente, para componentes prismáticos, dependendo dos requisitos do projeto, apenas o fresamento (Rota 1) pode fornecer características superficiais adequadas à aplicação. O fresamento também pode ser seguido de algum processo de tratamento térmico e/ou por algum processo de acabamento (retificação e/ou polimento) (Rota 2), de modo a alterar as propriedades mecânicas e suavizar a superfície da peça enquanto a precisão de forma e rugosidades são melhoradas. A Rota 3 inclui as operações que não envolvem remoção de material, podendo visar alterações das propriedades físico-mecânicas, enquanto a Rota 4 inclui apenas operações de acabamento e acabamento fino. A principal desvantagem da Rota 4 é a menor capacidade de remoção de material dos processos de acabamento, por exemplo a retificação, em comparação com o fresamento. Neste caso, caso ambas as operações forem realizadas em centros de usinagem; se a retificação for realizada em máquinas retificadoras dedicadas, a capacidade de remoção de material provavelmente será aumentada. Em relação ao polimento de peças logo após MA (DED) (Rota 4), é uma prática economicamente pouco sustentável, devido ao tempo demasiadamente elevado, visto que os valores de rugosidade das peças depositadas (por exemplo, $R_a > 50 \mu\text{m}$) precisam ser reduzidos para escala submicrométrica (tais como $R_a < 0,1 \mu\text{m}$), dependendo da aplicação do componente. Dessa forma, critérios de decisão precisam ser estabelecidos para selecionar a cadeia de processo mais eficaz a ser adotada.

Dependendo das características desejadas da(s) peça(s), alcançar certa precisão dimensional (por exemplo, qualidade de trabalho IT3 ou IT4) e rugosidades em níveis submicrométricos (tais como $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ e $R_z < 1 \mu\text{m}$) são fundamentais para que o componente cumpra sua função de forma eficiente durante sua vida útil no determinado sistema/projeto. Tais fatores

Figura 14 – Fluxograma de possíveis operações de pós-processamento em peças fabricadas por MA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

são definidos de acordo com a aplicação e necessidade do componente a ser manufaturado. No que tange à aplicação, o aço inoxidável AISI 316L tem sido empregado nas mais variadas indústrias, tais como médica (SUNDGREN *et al.*, 1985; PEUSTER *et al.*, 2006), nuclear (LOU *et al.*, 2017; SONG *et al.*, 2019), óleo e gás (ADAIR; ATTWOOD, 2014), alimentícia (FAILLE *et al.*, 2000; JULLIEN *et al.*, 2002), entre outras. Sendo que cada indústria/aplicação requer que sejam alcançados determinados níveis de propriedades mecânicas e qualidade superficial (em termos de tolerância dimensional e rugosidade). Por exemplo, atualmente, o aço inoxidável 316L é sugerido para aplicações biomédicas em placas, parafusos e pregos (ou pinos Steinmann) (KUNČICKÁ; KOCICH; LOWE, 2017; HARUN *et al.*, 2018). Além desses dispositivos de fixação, esse aço também é usado em equipamentos cirúrgicos (por exemplo, fórceps, porta matriz, tesoura ouro, cureta, entre outros) e certos componentes protéticos da articulação do joelho, quadril, dedos, tornozelo, entre outros³⁶ (SINGH; RAMAKRISHNA, 2017; AXINTE *et al.*, 2019). De acordo com Mattei *et al.* (2011), para a cirurgia de substituição total de quadril, esse aço é utilizado na haste, pescoço e cabeça femoral, cujo qual necessitam de uma rugosidade típica entre 0,01 e 0,05 $\mu\text{m } R_a$.

O aço inoxidável 316L foi desenvolvido na década de 1950 e foi usado como implantes de longa duração pelos próximos 30-40 anos (KUNČICKÁ; KOCICH; LOWE, 2017). Todavia, a análise de falha realizada em 50 pacientes no período de 1988 e 1991 demonstraram que a fratura e a corrosão (presença de vários mecanismos - corrosão por pites, frestas e atrito (termos que derivam da literatura inglesa: *pitting*, *crevicing* e *fretting*, respectivamente)) foram os principais modos de falha potencial nos dispositivos de aço 316L implantados em várias posições anatômicas (SIVAKUMAR *et al.*, 1995). Análises de falha em 11 próteses coletadas entre 1995-1996 com idade de serviço entre 9 e 21 anos (média de 13) revelaram corrosões no implante (WALCZAK; SHAHGALDI; HEATLEY, 1998). Além disso, outras aplicações clínicas de artroplastia total do quadril (bacia) de 1970 a 1990 demonstraram que os aços inoxidáveis 316L não são suficientemente resistentes à corrosão para uso a longo prazo (CHEN;

³⁶ Fios de fixação, suturas, próteses primárias de tela metálica mandibular, pinos de retenção para amálgama dental, hastes intramedulares (por exemplo, haste de Harrington), próteses estapediana (cirurgia no aparelho auditivo - substituição do estribo), cliques microvasculares (tratamento de Aneurismas Vasculares Cerebrais) são algumas outras possíveis aplicações do aço 316L (DAVIS, 2003)

THOUAS, 2015). Dessa forma, o mesmo é utilizado principalmente para implantes tipicamente temporários³⁷ (KUNČICKÁ; KOCICH; LOWE, 2017). Apesar da presença da camada³⁸ de óxido passivadora (constituída principalmente de Fe_2O_3 e Cr_2O_3 , (RAMAN *et al.*, 2006)) que melhora a resistência à corrosão em ambiente salino (como no caso do sangue) (DAVIS, 2003), a longo prazo pode ocorrer liberação de íons metálicos na corrente sanguínea durante a corrosão do material implantado, causando efeitos adversos à saúde do paciente (IBRAHIM *et al.*, 2017; WILSON, 2018). No sentido dos efeitos biológicos, segundo Ibrahim *et al.* (2017) e Eliaz (2019), o ferro (presença de $\approx 66\%$ Fe na composição do 316L) é um elemento fundamental para o transporte de oxigênio no corpo pelas hemácias, mas o excesso pode prejudicar o fígado, provocando diabetes e insuficiência cardíaca. Já o cromo ($\approx 19\%$) é associado às úlceras e distúrbios no sistema nervoso central. O níquel ($\approx 9\%$ Ni) é associado às alergias (como no caso de dermatite de contato) e também possui efeito tóxico em altas concentrações, com potencial cancerígeno. O molibdênio ($\approx 3\%$ Mo) é um elemento dietético essencial, mas em altas concentrações é tóxico, podendo interferir no metabolismo, diarreia, insuficiência cardíaca, coma, entre outros. Para superar essas possíveis complicações e mitigar tais efeitos adversos, novas gerações de aços inoxidáveis vêm sendo desenvolvidos, como os aços livres de níquel e com alta concentrações de nitrogênio (TALHA; BEHERA; SINHA, 2013).

Na Tabela 14 é apresentada um resumo de várias operações de pós-processamento aplicadas para melhorar a qualidade da superfície dos componentes de aço inoxidável 316L fabricados por diversas tecnologias de MA. Uma discussão de alguns artigos listados na Tabela 14 é exposta a seguir, seguindo a continuidade lógica da cadeia de processos discutida nos quatro itens apresentados na Figura 14.

Tabela 14 – Comparação geral do efeito de diversas operações de pós-processamento (PP) na rugosidade do aço inoxidável 316L (ou 316) fabricado por MA.

Ref.	Rugosidade após deposição [μm]	Rugosidade após PP [μm]	RR** [%]	Tempo de PP [min]	Processo de MA	PP	Geometria da amostra
Yamaguchi (2017)1	$R_z=102,1\pm 3,8$	$R_z=0,13\pm 0,07$	99,9	240	SLM	MAF	
Grego (2021)2	$R_a=8,8$	$R_a\approx 0,06^*$	99,3	-	SLM	μM	
Garthe (2021)3	$R_a=9,69\pm 2,52$, $R_z=64,86\pm 15,03$	$R_a=0,07\pm 0,01^*$, $R_z=0,6\pm 0,15^*$	99,3, 99,1	-	SLM	SP-AD	Plana
Dabwan (2021)4	$S_a=11,58$	$S_a=0,14^*$	98,8	0,2	L-PBF	M	
Iquebal (2017)5	$S_a=1,74^{***}$	$S_a=0,025$	98,6	-	SLM	SP-AD	
Yazdanpanah (2021)6	$R_a=14,75$	$R_a\approx 0,25$	98,3	-	L-SLM	G	
Chang (2019)7	$R_a\approx 8$	$R_a=0,18^*$	97,8	40	SLM	OECF+ECP	Plana, complexa
Wu (2020)8	$R_z=80,6\pm 19,6$	$R_z\approx 3^*$	96,3	105	SLM	MAF	Plana
Spierings (2013)9	$R_a=10$	$R_a=0,4$	96,0	-	SLM	T	Cilíndrica
Mesicek (2021)10	$R_a=9,5\pm 1,4$, $R_z=47,9\pm 7,0$	$R_a=0,5^*$, $R_z=4,4^*$	94,7, 90,8	482	SLM	SB+TB	Plana

Continua na próxima página...

³⁷ Apesar dos riscos e limitações presentes na utilização do material 316L SS dentro do corpo humano e devido às questões econômicas, implantes de longo prazo (a depender da situação clínica do paciente) também são uma opção viável (HARUN *et al.*, 2018).

³⁸ Manivasagam, Dhinasekaran e Rajamanickam (2010) citam que esse filme de óxido possui espessura de cerca de 3,6 nm.

Ref.	Rugosidade após deposição [μm]	Rugosidade após PP [μm]	RR** [%]	Tempo de PP [min]	Processo de MA	PP	Geometria da amostra
Kirsch (2020)11	$R_z=43\pm 2$	$R_z\approx 2,5$	94,2	-	L-SLM	CFG	
Rotty (2016)12	$R_a=1,5$	$R_a=0,1^*$	93,3	20	DED	EP	-
Zhang (2022)13	$R_a=10,63\pm 2,02$, $R_z=62,38\pm 10,81$	$R_a=0,81\pm 0,09^*$, $R_z=4,96\pm 0,45^*$	92,4, 92,0	32	L-PBF	MDIF	Cilíndrica (canal interno)
Iquebal (2017)5	$S_a=15,76$	$S_a=1,74$	89,0	-	SLM	M	Plana
Liu (2020)14	$R_a=9,27\pm 2,03$	$R_a=1,11\pm 0,06$	88,0	-	SLM	M	Plana, canal interno, cilíndrica, cônica
Blinn (2021)15	$S_a=10,99\pm 1,27$, $S_z=128,65\pm 15,47$	$S_a=1,39\pm 0,47$, $S_z=9,81\pm 2,15$	87,4, 92,4	0,6	L-PBF	M	
Wu (2018)16	$R_a\approx 23$, $R_z\approx 80$	$R_a\approx 3$, $R_z\approx 8^*$	87,0, 90,0	15	SLM	MAF	Plana
Chen (2021)17	$S_a=4,84$	$S_a=0,65$	86,6	-	L-PBF	LP	
Kirsch (2020)11	$R_z=43\pm 1$	$R_z\approx 6$	86,0	-	L-SLM	PG	
Blinn (2021)15	$S_a=10,99\pm 1,27$, $S_z=128,65\pm 15,47$	$S_a=1,98\pm 0,95$, $S_z=17,14\pm 4,15$	82,0, 86,7	0,06	L-PBF	G	
Bruzzo (2021)18	$S_a=10,35\pm 0,42$	$S_a=1,92\pm 0,11$	81,4	-	LMD	LP	Cilíndrica
Amanov (2020)19	$R_a\approx 1,6$, $R_z\approx 9,9$	$R_a\approx 0,3^*$, $R_z\approx 2,5^*$	81,3, 74,7	-	SLM	UNSM	
Alharbi (2022)20	$R_a\approx 30$	$R_a=6,88^*$	77,1	15	SLM	USPee	Plana
Zhang (2019)21	$R_a\approx 12$, $R_z\approx 72$	$R_a\approx 2,8^*$, $R_z\approx 20^*$	76,7, 72,2	75	SLM	MAF	
Sugavaneswaran (2018)22	$R_a=6,6$, $R_z=35,7$	$R_a=1,6$, $R_z=9,2$	75,8, 74,2	-	DMLS	SPee	
Kaynak (2019)23	$R_a=7\pm 1$	$R_a=1,74$	75,1	-	SLM	T	Cilíndrica
An (2022)24	$S_a=15,67\pm 3,25$	$S_a=4,51^*$	71,2	-	L-PBF	EMCP	Cilíndrica (canal interno)
Wang (2021)25	$S_a=9,99$, $S_z=78,37$	$S_a=3,54^*$, $S_z=26,05^*$	64,5, 66,8	10	SLM	CPee+ECP	Estrutura de treliça
Kaynak (2019)23	$R_a=7\pm 2$	$R_a=2,7$	61,4	240	SLM	DF	Cilíndrica
Melia (2020)26	$S_a=10,2$, $S_z=157,3$	$S_a=5,5$, $S_z=75$	46,1, 52,3	12	PBF	EP	Plana
Kaynak (2019)23	$R_a=7\pm 3$	$R_a=4,1$	41,4	-	SLM	VSF	Cilíndrica
Zhang (2022)13	$R_a=10,63\pm 2,02$, $R_z=62,38\pm 10,82$	$R_a=6,32^*$	40,5	16	L-PBF	MAF	Cilíndrica (canal interno)
Melia (2020)26	$S_a=10,2$, $S_z=157,4$	$S_a=8,8$, $S_z=147,2$ $S_a=9,9$, $S_z=166,6$ $S_a=2,10\pm 0,75$, $S_z=44,50\pm 13,45$	13,7, 6,4 2,9, +11,6	180	PBF PBF	TB LP	Plana
Tyagi (2019)27	$R_a\approx 20$	$S_a=13,88\pm 2,65$, $S_z=226,44\pm 17,68$ $S_a=5,22\pm 2,46$, $S_z=48,54\pm 21,41$	-	-	SLM SLM	EP SB	Plana (interna)
Masek (2019)86	-	$R_a=0,27-0,52$	-	-	DED	M	
Gong and Li (2019)29	-	$R_a\approx 0,8^*$	-	13	LMD	M	Plana
Coelho (2018)30	-	$R_z\approx 0,03^*$	-	-	PBF	μM	

A ordem (decrecente) das operações de PP apresentadas é baseada em sua capacidade de RR.

*Melhor condição. **Redução de rugosidade (RR) (RR=rugosidade inicial/final). ***Superfície fresada. Abreviações: *Selective laser melting* (SLM), *Laser powder bed fusion* (L-PBF), *Direct energy deposition* (DED), *Laser metal deposition* (LMD), *Direct metal laser sintering* (DMLS), *Magnetic field-assisted finishing* (MAF), *Micromilling* (μM), *Surface polishing using abrasive disks* (SP-AD), *Milling* (M), *Grinding* (G), *Overpotential electrochemical polishing* (OECP), *Electrochemical polishing* (ECP), *Turning* (T), *Sandblasting* (SB), *Tumbling* (TB), *Creep feed grinding* (CFG), *Electropolishing* (EP), *Magnetically driven internal finishing* (MDIF), *Laser polishing* (LP), *Pendulum grinding* (PG), *Ultrasonic nanocrystalline surface modification* (UNSM), *Ultrasonic shot peening* (USPee), *Shot peening* (SPee), *Electrochemical-mechanical combined polishing* (EMCP), *Cavitation peening* (CPee), *Drag finishing* (DF), *Vibratory surface finishing* (VSF), *Chemopolishing* (CP). Optouse pela não tradução desses termos, para que as siglas sejam as mesmas relatadas nas próprias referências.

1=Yamaguchi, Fergani e Wu (2017),2=Greco et al. (2021),3=Garthe et al. (2021),4=Dabwan et al. (2021),5=Iquebal et al. (2017),6=Yaz-danpanah et al. (2021),7=Chang et al. (2019),8=Wu et al. (2020),9=Spierings, Starr e Wegener (2013),10=Mesicek et al. (2021),11=Kirsch et

al. (2020),12=Rotty *et al.* (2016),13=Zhang e Wang (2022),14=Liu *et al.* (2020),15=Blinn *et al.* (2021),16=Wu e Yamaguchi (2018),17=Chen *et al.* (2021),18=Bruzzo *et al.* (2021),19=Amanov (2020),20=Alharbi (2022),21=Zhang, Chaudhari e Wang (2019),22=Sugavaneswaran *et al.* (2018),23=Kaynak e Kitay (2019),24=An, Wang e Zhu (2022),25=Wang, Castellana e Melkote (2021),26=Melia *et al.* (2020),27=Tyagi *et al.* (2019),28=Masek *et al.* (2019),29=Gong e Li (2019),30=Coelho, Azevedo e Assis (2018).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando o fresamento, Iquebal *et al.* (2017) reduziram a rugosidade inicial ($15,76 \mu\text{m } S_a$ após laser-PBF) para $\mu\text{m } S_a$. Em seguida, a qualidade foi melhorada com polimento superficial (discos abrasivos), atingindo $0,025 \mu\text{m } S_a$ sem marcas da fresa. Liu *et al.* (2020) relataram que a rugosidade da parte superior da amostra fabricada por SLM foi de $9,27 \pm 2,03 \mu\text{m } R_a$. O processo híbrido SLM e fresamento melhorou a rugosidade para $1,11 \pm 0,06 \mu\text{m } R_a$. Dabwan *et al.* (2021) melhoraram a rugosidade S_a da amostra fabricada por SLM de $11,58 \mu\text{m}$ para $0,14 \mu\text{m}$ em apenas 12 s. Blinn *et al.* (2021) reduziram a rugosidade inicial (após L-PBF) de $10,99 \pm 1,27 \mu\text{m } S_a$ para $1,39 \pm 0,47 \mu\text{m } S_a$ e $128,65 \pm 15,47 \mu\text{m } S_z$ para $9,81 \pm 2,15 \mu\text{m } S_z$ em cerca de 36 s. Masek *et al.* (2019) realizaram experimentos de fresamento em 316L SS produzido com DED (usando pó e arame como matéria-prima), obtendo uma rugosidade final de $0,27$ - $0,52 \mu\text{m } S_a$ (a rugosidade inicial não foi reportada). Gong e Li (2019) alcançaram uma rugosidade próxima de $0,8 \mu\text{m } S_a$ em peças fabricadas por LMD (a rugosidade inicial também não foi descrita). Os autores relaram que o fresamento concordante resulta em uma qualidade superior das superfícies usinadas quando comparada à operação realizada de modo discordante. O mesmo fato foi reportado por Coelho, Azevedo e Assis (2018) durante o microfresamento de aço 316L fabricado por PBF, tendo obtido - na melhor condição com $d_{efetivo} = 800 \mu\text{m}$ - valores de rugosidade próximos de $0,03 \mu\text{m } R_z$ para o movimento concordante e $0,3 \mu\text{m } R_z$ para o discordante (10 vezes maior). Segundo os autores, tal discrepância entre o fresamento concordante e discordante pode ser associado à anisotropia do material. Usando microfresas ($d_{efetivo} = 50 \mu\text{m}$), Greco *et al.* (2021) reportaram uma redução de 8,8 para cerca de $0,06 \mu\text{m } R_a$ em amostras de aço 316L produzidas por SLM.

Os trabalhos supracitados exemplificam a possibilidade da utilização do fresamento em peças de aço inoxidável 316L produzidas por MA, sendo aplicado, possivelmente, como um dos processos iniciais utilizados para melhorar a qualidade superficial das peças. Durante a fase de revisão sistemática da literatura, apenas estes oito artigos avaliaram o impacto do fresamento nas características superficiais de amostras de aço 316L fabricadas por MA. Todavia, outros estudos também realizaram pós-processamento por fresamento em materiais distintos³⁹, podendo-se citar os seguintes: Taminger *et al.* (2004) avaliaram ligas metálicas de alumínio (2219), produzidas por *Electron Beam Freeform Fabrication* (EBF³). Brinksmeier *et al.* (2010) liga metálica 18 Maraging 300 (DIN 1.2709, X3NiCoMoTi18-9-5), produzida por SLM. Priarone *et al.* (2012) composto intermetálico γ -TiAl, fabricado por *Electron Beam Melting* (EBM). Al-Ahmari *et al.* (2016) liga metálica γ -TiAl fabricado por EBM. Isaev *et al.* (2016) liga de titânio VT-6

³⁹ Estes artigos não foram abordados detalhadamente nesse Capítulo por não analisarem o aço 316L, que é o foco desta tese

(equivalente ao Ti-6Al-4V), feita por EBM. [Iquebal et al. \(2016\)](#) Ti-6Al-4V, produzidas por EBM. [Hirano, Furuki e Kousaka \(2020\)](#), Ti-6Al-4V, manufaturada por L-PBF. [Milton et al. \(2016\)](#) Ti-6Al-4V, produzidas por SLM. [Bagehorn, Wehr e Maier \(2017\)](#) Ti-6Al-4V, produzidas por LBAM. [Zhao et al. \(2018\)](#) ligas de Fe-Cr, produzidas por LBAM. [Guo et al. \(2018b\)](#) liga de alta entropia CoCrFeMnNi, manufaturadas por SLM. Embora o pós-processamento por fresamento de metais fabricados via MA já ter sido empregado com êxito na literatura, visto que a operação de fresamento é versátil (diferentes tipos de fresas são aplicáveis para a fabricação de diferentes geometrias e materiais produzidos por processos distintos, cuja produtividade e qualidade da peça são afetadas pelas condições experimentais), a superfície fresada apresenta marcas de corte visíveis e rebarbas (intrínsecas ao processo).

Com o torneamento, [Spierings, Starr e Wegener \(2013\)](#) melhoraram a qualidade da superfície do aço inoxidável 316L de $10 \mu\text{m}$ (após SLM) para $0,4 \mu\text{m } R_a$. Após o torneamento, as peças foram polidas manualmente, melhorando o R_a de $0,4$ para $0,1 \mu\text{m}$. [Kaynak e Kitay \(2019\)](#) relataram uma melhora na rugosidade em peças de 316L feitas por SLM de 7 ± 1 a $1,74 \mu\text{m } R_a$. Dois outros processos abrasivos foram realizados, a saber: acabamento por arrasto (do inglês, *drag finishing* - DF) e tamboreamento (do inglês, *vibratory surface finishing* - VSF). O R_a foi de $2,7 \mu\text{m}$ após DF-4h e $4,1 \mu\text{m}$ após VSF. Assim, o menor R_a foi obtido na operação de torneamento. No entanto, este processo é limitado a geometrias cilíndricas. Dessa forma, dentre os processos analisados, os autores consideraram que o acabamento por arrasto é o mais promissor para melhorar a qualidade superficial de peças complexas feitas por MA.

Em termos de retificação, [Yazdanpanah et al. \(2021\)](#) relataram uma melhora da rugosidade de $14,75 \mu\text{m}$ (SLMed) para $0,25 \mu\text{m } R_a$. Usando retificação pendular, [Blinn et al. \(2021\)](#) reduziram a rugosidade inicial (após L-PBF) de $10,99 \pm 1,27 \mu\text{m } S_a$ para $1,98 \pm 0,95 \mu\text{m } S_a$ e $128,65 \pm 15,47 \mu\text{m } S_z$ para $17,14 \pm 4,15 \mu\text{m } S_z$ em cerca de 3,6 s. Usando retificação pendular e profunda, a rugosidade inicial (após laser-SLM) foi reduzida de $42\text{-}44 \mu\text{m}$ para $6,0 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m } R_z$, respectivamente ([KIRSCH et al., 2020](#)). Durante a fase de revisão sistemática da literatura, apenas três artigos supracitados avaliaram o impacto da retificação nas características superficiais de amostras de aço 316L fabricadas por MA. Todavia, outros estudos também realizaram pós-processamento por retificação em materiais distintos (pode-se citar os seguintes: [Brinksmeier et al. \(2010\)](#) avaliaram a integridade superficial do metal 18 Maraging 300 (DIN 1.2709, X3NiCoMoTi18-9-5), produzido por SLM. [Beaucamp et al. \(2015\)](#) Ti-6Al-4V, produzidas por *Electron Beam Melting* (EBM) e SLM. [Srivastava e Pavel \(2015\)](#) Ti-6Al-4V, produzidas por *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS). [Iquebal et al. \(2016\)](#) peças de Ti-6Al-4V produzidas por EBM. [Guo et al. \(2018a\)](#) Poliamida 12 (PA12), produzido por SLS. [Guo et al. \(2018b\)](#) liga de alta entropia CoCrFeMnNi manufaturadas por SLM. [Teng et al. \(2019\)](#) liga AlSi10Mg, depositada por SLM.), mas estes não foram abordados detalhadamente nesse Capítulo por não analisarem o aço 316L, que é o foco desta tese.

Esses trabalhos supramencionados exemplificam a possibilidade da utilização da reti-

ficação em peças metálicas produzidas por MA, sendo aplicado como um dos processos após deposição ou como um processo intermediário entre a deposição e o polimento para melhorar a qualidade superficial das peças. Todavia, até o momento, não foram encontradas pesquisas que utilizassem rebolos (abrasivos convencionais ou superabrasivos) de pequeno diâmetro que pudessem substituir ou complementar o uso do fresamento, em centros de usinagem. Atuando nessa lacuna, esta tese focará em retificação com ferramentas de pequeno diâmetro a serem utilizadas em máquinas híbridas (*in-situ*) ou em centros de usinagem adaptados (*ex-situ*), onde o fresamento de desbaste e acabamento poderiam ser substituídos por uma ferramenta abrasiva para desbaste mais semiacabamento ou acabamento fino por outra ferramenta abrasiva ou por MAF - detalhado no Subitem 2.3.

Apesar do pós-processamento por retificação de metais fabricados via MA já ter sido utilizado com sucesso na literatura, a superfície retificada apresenta marcas dos grãos abrasivos (intrínsecas ao processo). Apesar da retificação ser tradicionalmente uma operação de acabamento final dos componentes (MALKIN; GUO, 2008), sua eficácia está ligada às condições de retificação, rebolo e seu condicionamento (dressagem) (WEGENER *et al.*, 2011). Em alguns casos, a implementação de sistemas periféricos e auxiliares na máquina são necessários para atingir a eficiência desejada, tais como monitoramento (por exemplo, emissão acústica), sistemas de fixação, refrigeração, balanceamento dinâmico e dressagem do rebolo, desenvolvimento de novos rebolos, entre outros, que podem demandar altos recursos tecnológico-econômicos.

No que tange às operações que não utilizam remoção de material, usando *shot peening* (SPee), Sugavaneswaran *et al.* (2018) melhoraram a qualidade da superfície do aço 316L SS fabricado por DMLS, reduzindo a rugosidade R_a/R_z de 7,1/36,5 μm para 1,3/8,1 μm . Alharbi (2022) realizou SP ultrassônico; a rugosidade inicial ($\approx 30 \mu\text{m}$ - após SLM) foi reduzida para 6,88 μm R_a . Em ambos os estudos, a superfície apresenta um incremento na dureza após SP (de 230 para 324 V (SUGAVANESWARAN *et al.*, 2018) e 452 V (ALHARBI, 2022)). Apresenta deformação plástica severa, inerente ao processo.

Chen *et al.* (2021) estudaram o polimento a laser como pós-processo do aço 316L SS fabricado por L-PBF, melhorando a rugosidade de 4,84 para 0,65 μm S_a . Bruzzo *et al.* (2021) poliram a superfície do aço 316L fabricado por LMD de $10,35 \pm 0,42 \mu\text{m}$ para $1,92 \pm 0,11 \mu\text{m}$ S_a . Embora nenhum equipamento auxiliar seja necessário (a mesma fonte de energia de AM pode ser usada para polir a peça), vários passes podem ser necessários quando os valores iniciais de rugosidade são elevados (por exemplo, $R_a > 20 \mu\text{m}$ e $R_z > 100 \mu\text{m}$), tendo uma alto custo/tempo de pós-processamento.

An, Wang e Zhu (2022) propuseram um novo processo de polimento combinado eletroquímico-mecânico, utilizando um rebolo com grão grossos, outro com grãos finos e um cátodo como ferramentas para pós-processamento de aço 316L SS com canais internos fabricados por L-PBF. Para os canais retos com diâmetros de 30 mm e 5 mm, a rugosidade S_a diminuiu de 15,67 e 15,92 μm para 4,51 e 5,06 μm , respectivamente. Em relação aos canais curvos com diâmetros de

18 mm e 9 mm, a rugosidade S_a diminuiu de 20,26 e 18,18 μm para 4,07 e 6,02 μm , respectivamente. Embora a taxa de redução de rugosidade para diâmetros menores seja menor do que para diâmetros maiores (na faixa de 66,9-68,2% contra 71,2-79,9%), o método melhora efetivamente a qualidade da superfície de canais internos com diâmetros pequenos.

Chang *et al.* (2019) investigaram a combinação de polimento eletroquímico de sobrepotencial e eletroquímico; reduzindo a rugosidade inicial de $8 \mu\text{m}$ (após SLM) para 0,18 μm R_a em 40 min de tempo de polimento. Rotty *et al.* (2016) utilizaram eletropolimento (EP); a rugosidade inicial das amostras preparadas pelo laser-AM foi reduzida em 20 min de 1,5 μm para 0,1 μm R_a . Melia *et al.* (2020) avaliaram o impacto na rugosidade após algumas operações de pós-processamento (sendo tamboreamento (TB), polimento a laser e EP) de amostras de aço 316L SS fabricadas por PBF. O EP foi o mais eficaz na redução da rugosidade, onde a rugosidade R_a inicial foi reduzida de 10,2 para 5,5 μm e R_z de 157,3 para 75,1 μm . Tyagi *et al.* (2019) realizaram jateamento (SB), polimento químico e EP de superfícies internas de 316 SS produzido com DMLS. A rugosidade R_a inicial estava acima de 20 μm . Os valores de rugosidade S_a/S_z após SB, CP e EP foram $13,88 \pm 2,66 / 226,44 \pm 17,68 \mu\text{m}$, $2,10 \pm 0,75 / 44,50 \pm 13,45 \mu\text{m}$ e $5,22 \pm 2,46 / 48,54 \pm 21,41 \mu\text{m}$, respectivamente. Assim, o processo EP foi o mais eficaz para melhorar da superfície. No entanto, EP tem limitações devido à acessibilidade do contra-eletródo em formas complexas. Os processos de polimento químico e abrasivos podem ser algumas alternativas para superar essa limitação. Nesse sentido, o MAF⁴⁰, por ser um processo mecânico, é mais ambientalmente sustentável que processos químicos.

Usando o processo de MAF, Yamaguchi, Fergani e Wu (2017) relataram uma melhoria na rugosidade da superfície de $102,1 \pm 3,8 \mu\text{m}$ R_z em 240 min de tempo de polimento de componentes de 316L SS produzidos por SLM. Wu *et al.* (2020) reduziram a rugosidade inicial ($80,6 \pm 19,6 \mu\text{m}$ R_z após SLM) para aproximadamente 3 μm R_z em 105 min de tempo de polimento. Zhang e Wang (2022) usaram esferas de ímãs revestidas por MAF para melhorar a qualidade superficial dos tubos de 316L SS produzidos por L-PBF. Na melhor condição, ocorreu melhora da rugosidade de $10,63 \pm 2,02$ a $0,81 \pm 0,09 \mu\text{m}$ R_a e $62,38 \pm 10,81$ a $4,96 \pm 0,45 \mu\text{m}$ R_z em 32 min de tempo de polimento. Esses estudos e outros são detalhados no Subitem 2.3.2. Embora o MAF possa melhorar a qualidade das superfícies (escala de rugosidade de nano a submicrométrica), uma etapa intermediária de pós-processamento entre a deposição e o polimento pode ser necessária para corrigir erros geométricos e dimensionais (o MAF não corrige esses erros - visto que essa é uma operação de cópia de pressão) e diminuir o tempo de polimento necessário para que o MAF atinja os valores de rugosidade alvo.

Por fim, destaca-se a aplicabilidade de diversos processos de pós-processamento para várias técnicas de MA. Ressalta-se a limitação da utilização de operações de usinagem convencional, como no caso das operações de fresamento e retificação (focos neste trabalho), para gerar superfícies isentas de marcas da ferramenta e em níveis nanométricos de rugosidade. Para tal,

⁴⁰ Uma descrição detalhada sobre esse processo está descrita no Subitem 2.3.

pode ser necessário empregar técnicas de usinagem não convencionais (por exemplo, o processo de MAF - Subitem 2.3).

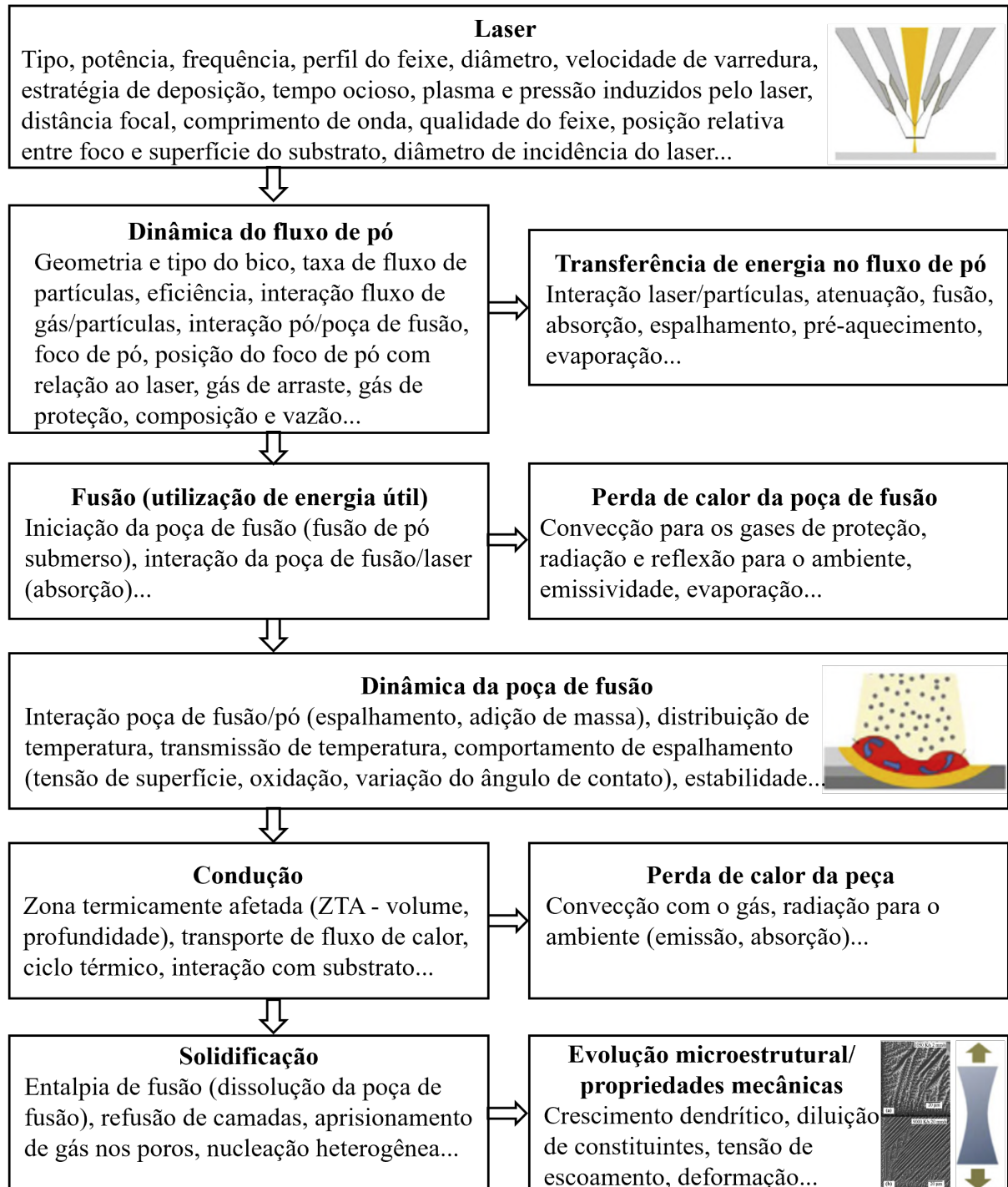
Em termos de fabricação de metal por MA, conforme já discutido, PBF, DED e SL são os três processos mais utilizados (KOK *et al.*, 2018), sendo que a escolha de qual processo de fabricação se dá pela aplicação e necessidade do componente a ser manufaturado. Nesse sentido, como o foco desta pesquisa é relacionado ao processo de DED, essa técnica será a única abordada com maior nível de detalhamento, discutindo parâmetros, mecanismos e condições que afetam o processo e a peça, bem como suas vantagens e limitações (e como superá-los). Todavia, para uma abordagem dos outros 6 processos, sugere-se a leitura dos artigos/livros de revisão de Wong e Hernandez (2012), Gibson, Rosen e Stucker (2015), Gao *et al.* (2015), Ngo *et al.* (2018) e Prakash, Nancharaih e Rao (2018), nos quais são discutidos todos os processos de fabricação em MA, com suas peculiaridades, bem como suas aplicações, benefícios, desafios a serem superados e tendências futuras da área.

2.2.5 DED

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), devido aos diversos fabricantes e termos de marca registrada, o processo de DED foi o termo consolidado por normas, mas também pode ser conhecido como *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), *Directed Light Fabrication* (DLF), *Direct Metal Deposition* (DMD), *3D Laser Cladding*, *Laser-Based Metal Deposition* (LBMD), *Laser Freeform Fabrication* (LFF), *Laser Direct Casting*, *LaserCast*, *Laser Consolidation* e *Las-Form*. Silbernagel (2018) cita outras possíveis nomenclaturas também consolidadas na literatura, tais como: *Direct Laser Deposition* (DLD), *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM), *Electron Beam Freeform Fabrication* (EBF³), *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), *Three-Dimensional Welding*, entre outras. Embora existam todos esses nomes, o princípio físico geral é o mesmo, podendo ter variações em parâmetros de processo (potência e tipo de laser, forma de entrega da fonte de calor e da matéria-prima, entre outros), de acordo com os fabricantes. Na Figura 15 são apresentados alguns princípios físicos envolvidos no processo de DED em um determinado instante de tempo, bem como alguns parâmetros de processo, condições e interações envolvidas em cada evento e subevento.

No tocante ao princípio físico, conforme já mencionado, o DED combina a entrega de material (pó ou arame) e energia (laser, feixe de elétrons ou arco elétrico) para formação por camadas da peça (THOMPSON *et al.*, 2015). Na Figura 16 é apresentada um desenho esquemático do processo, que envolve laser como fonte de energia concentrada, pó como matéria-prima e os gases de proteção sendo direcionados por um bico (nesse caso é exibido um bico coaxial múltiplo, mas pode ser simples), para geração da poça de fusão. Com uma determinada velocidade de movimentação do cabeçote, forma-se uma camada de material depositado no substrato. Por meio de movimentos nos eixos X, Y e Z da peça e do cabeçote, outras camadas são depositadas até que a peça esteja com a geometria desejada.

Figura 15 – Princípios físicos envolvidos no DED em um determinado instante de tempo.

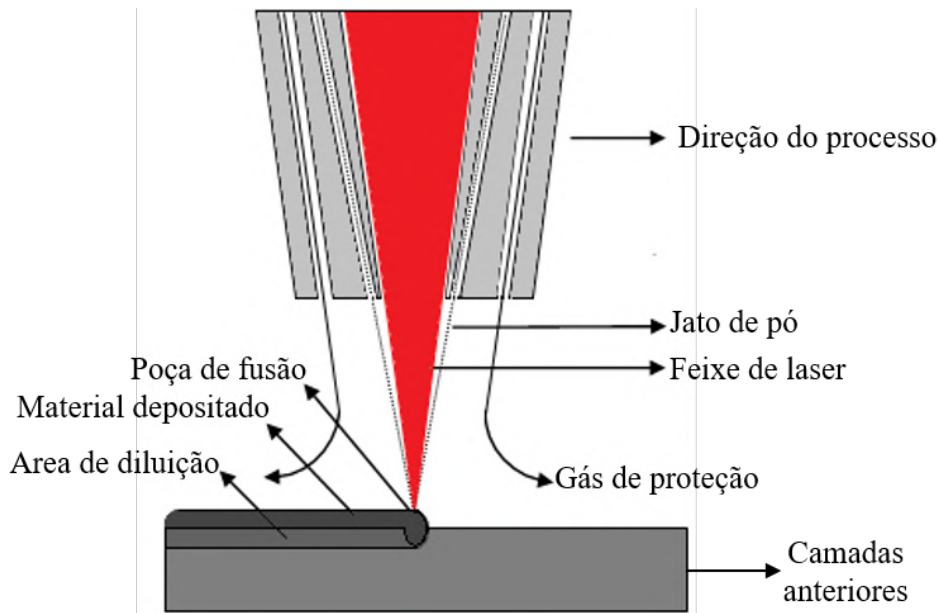


Fonte: adaptado de [Thompson et al. \(2015\)](#).

Todos os fatores (fonte de energia – será tratado especificamente do laser -, matéria-prima, gás de proteção, bico, velocidade e substrato) descritos na Figura 16 são fatores e condições que governam diretamente a eficiência (ou ineficiência) do processo em questão. Nesse sentido, a influência desses será discutida a seguir.

Em relação à fonte de energia, [Brandt \(2017\)](#) cita que para a MA de metais, os lasers de

Figura 16 – Desenho esquemático do processo de DED.



Fonte: adaptado de [3Dprinting \(2020\)](#).

dióxido de carbono (CO₂), rubi e Nd:YAG⁴¹ (do inglês, *neodymium-doped yttrium-aluminum-garnet*) tinham dominância do mercado até os anos 2000 e desde essa época, os lasers de fibra, disco e diodo vêm ganhando espaço. Em consonância com [Dahotre e Harimkar \(2008\)](#), os lasers de CO₂ são considerados lasers de gás com comprimento de onda (λ) de 10.600 nm e os lasers de Rubi e Nd:YAG (mais utilizado) são lasers no estado sólido com λ igual a 694 e 1.064 nm, respectivamente. Os autores ressaltam que os lasers baseados em gases possuem algumas vantagens quando comparados ao estado sólido: gases atuam como meio homogêneo; são facilmente transportados para resfriamento e reposição, e com relativo baixo custo. Todavia, devido as suas baixas densidades, um elevado volume é requerido (e, conseqüentemente, maior espaço de armazenamento) e, devido à alta magnitude do λ , pode resultar em um processo menos eficiente (em termos energéticos). Além disso, [Birnbaum, Aggarangsi e Beuth \(2003\)](#) ressaltam os lasers de CO₂ em DED podem requerer potências elevadas, com capacidade máxima próxima de 18 kW.

Todavia, conforme ressaltado por [Brandt \(2017\)](#), embora o laser seja um elemento primordial (sendo a potência do laser, P , um dos parâmetros primários do processo de DED), ele não deve ser isolado, deve-se sim considerar um conjunto integrado de elementos cruciais para a adição dos materiais. Dessa forma, a fonte de laser deve ser associada a um processamento ótico e sistemas mecânicos precisos para focar a entrega do feixe da maneira mais robusta e eficiente possível (maior captura de pó), sendo diretamente responsáveis pela formação do ponto focal e energia do processo e, conseqüentemente, gradiente térmico da poça de fusão. [Thompson et al.](#)

⁴¹ Segundo [Dahotre e Harimkar \(2008\)](#), o laser Nd:YAG consiste em um material hospedeiro de YAG cristalino (Y₃Al₅O₁₂) com no máximo 2% de íons dopados na sua rede cristalina de Nd³⁺, podendo a saída do mesmo ser contínua, pulsada ou Q-comutada. De acordo com [Thompson et al. \(2015\)](#), a maioria das máquinas de DED utilizam laser no modo de onda contínua para o processo.

(2015) citam que a energia específica (E , dada em J/mm^2 - ver Equação 2.1) pode ser utilizada para quantificar o fornecimento de energia em relação à área de material depositada, que também pode ser expandido em termos de exposição volumétrica (J/mm^3). Todavia, é necessário ressaltar que essa equação não é válida para todas as faixas de potência do laser e velocidade transversal do feixe, visto que em valores extremos os dados obtidos pela equação não convergem com resultados práticos.

$$E = \frac{P}{2r_b V_b} \quad (2.1)$$

Onde: E é a energia específica, P é a potência do laser, r_b é o raio do feixe e V_b é a velocidade transversal do feixe.

Em termos de energia do processo, propriedades do laser, pó e do substrato são fundamentais para uma deposição adequada. Dahotre e Harimkar (2008) citam que os principais parâmetros do laser que afetam o processo, além do λ , são a intensidade, coerência espacial e temporal, ângulo de incidência, polarização e tempo de incidência. Já em termos do material (pó e substrato), os autores apontam absorvidade, condutividade térmica, calor específico e latente e densidade. Nesse sentido, Dass e Moridi (2019) ressaltam que acompanhar como a energia da fonte de calor é distribuída durante o DED é essencial para reduzir a perda energética e maximizar a entrega de energia para a poça de fusão. Por se tratar de um processo com conservação de energia, Lia *et al.* (2017) definiram o balanço energético no DED de acordo com a Equação 2.2:

$$Q_{IN} = Q_{ABS} + Q_{DEP} + Q_{REF} + Q_{LOST} \quad (2.2)$$

Onde: Q_{IN} é a energia total do laser fornecida ao sistema, Q_{ABS} é a energia absorvida pelo substrato, Q_{DEP} é a energia absorvida pelo pó, Q_{REF} é a energia refletida pelo substrato e Q_{LOST} é a energia perdida pelo pó (composto pela energia refletida, energia perdida na evaporação e energia perdida devido ao pó não/semi fundido). De acordo com os resultados experimentais de Lia *et al.* (2017), durante a deposição do pó durante o DED, do total da energia fornecida, a variação de energia relativa à Q_{ABS} foi entre 6 e 10%; Q_{DEP} , entre 29 e 32%; Q_{REF} , entre 44 e 52% e Q_{LOST} , entre 11 e 14%. Sendo assim, aproximadamente 40% da energia do laser foram absorvidas pelo substrato e pelo pó, e 60% perdidas pela reflexão do substrato e do pó.

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), do ponto de vista térmico, o DED é um processo que gera poças de fusão com elevadas taxas de resfriamento (entre 10^3 e 10^5 °C/s), definido pela Equação 2.3 e, conseqüentemente, grandes gradientes térmicos, denominados por G e com unidades em K/cm, sendo definido pela Equação 2.4. Os autores ressaltam que, dependendo do material, elevadas taxas de resfriamento podem produzir estruturas singulares de grãos solidificados e/ou grãos com estruturas não equilibradas, impossíveis de serem encontradas por meio de processamento tradicional. Outro ponto importante ressaltado é em relação ao histórico térmico da peça (que tem relação direta entre microestrutura/propriedades mecânicas),

devido à natureza do processo de deposição consecutiva de camadas para sua formação. Ainda em relação à microestrutura, [Dass e Moridi \(2019\)](#) ressaltam que para o DED, além da taxa de resfriamento e do gradiente térmico, a velocidade da frente de solidificação (ou velocidade interfacial), R (cm/s) (definido pela Equação 2.5), também é um parâmetro importante. Sendo que a relação entre os parâmetros G e R fornecem o mapa térmico do processo, que pode ser usado para prever a microestrutura resultante.

$$\text{Taxa de resfriamento} : \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\text{Gradiente térmico} : G = |\Delta T| \quad (2.4)$$

$$\text{Velocidade interfacial} : R = \frac{1}{G} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

Onde: T é a temperatura e t é o tempo.

Por fim, vale ressaltar que o entendimento da interação laser/peça é complexo e dependente de várias propriedades físico-químicas envolvidas, mas seu conhecimento torna-se fundamental para o processo e tem relação direta com as microestruturas e propriedades mecânicas resultantes da peça.

Em relação à matéria-prima, o pó armazenado no *hooper* é fornecido ao sistema por meio de gravidade ou transportado por pressão pelo gás de proteção até o cabeçote de deposição ([DAHOTRE; HARIMKAR, 2008](#)). Nesse sentido, vale destacar a possibilidade da existência de dois ou mais *hoopers*, que podem conter diferentes tipos de pós para a construção de materiais funcionais gradientes, conforme já discutido na Subseção 2.2.1. A tipologia e morfologia do pó também afetam o processo, conforme já detalhado anteriormente na Subseção 2.2.1.1.

No tocante aos gases de proteção, assim como nos processos de soldagem, possuem função de proteger a poça de fusão de oxidação na presença de ar ([GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015](#)). O processo DED pode ser realizado em uma câmara inerte fechada ou não. Para o primeiro caso, segundo os autores, sistemas de remoção de oxigênio (O_2) e recirculação de gás são usados para manter a concentração de O_2 próxima ou abaixo de 10 partes por milhão (ppm). Em consonância com ([LINDE, 2018](#)), os gases inertes são utilizados nos cones internos do bico (jatos adicionais também são possíveis) para transportar pó e laser, de forma eficaz, e os mais usados no DED-L são: argônio (Ar), hélio (He) e/nitrogênio (N), sendo o Ar o mais comum e o terceiro gás mais comum no planeta Terra. Vale ressaltar que a escolha do tipo de gás, velocidade de entrega e quantidade fornecida são fundamentais para garantir um ambiente adequado para evitar contaminação indesejada à superfície e, conseqüentemente, construir uma peça de qualidade.

[Cortina et al. \(2018\)](#) ressaltam que as características geométricas do bico é um fator fundamental no processo, com influência direta na eficiência na deposição. Conforme dito anteriormente, existem duas configurações possíveis de bicos: coaxial e simples, sendo o primeiro mais eficiente (em termos de captura de pó e entrega dos gases de proteção) e o segundo por possuir maior simplicidade e possuir menor custo ([GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015](#)).

Além da potência do laser (P), já discutido anteriormente, a velocidade transversal de deposição (v) também é considerada um parâmetro primário com influência no processo. [Liu et al. \(2018\)](#) avaliaram que v é inversamente proporcional às dimensões da camada depositada e à densidade energética. [Wołosz, Baran e Polański \(2020\)](#) citam que o aumento das velocidades de deposição gera camadas (e poças de fusão) com menores dimensões (menor altura e comprimento), devido ao menor tempo de interação entre o laser e o substrato. Como resultado, a temperatura do substrato diminui, assim como a adesão das partículas. Nesse sentido, cabe ressaltar que pela velocidade de deposição afetar a geometria da camada depositada no DED (que também tem relação direta com qualidade dimensional e superficial da peça), a escolha de seu valor é fundamental para que ocorra uma correta determinação do número de passes durante a manufatura do componente, caso contrário, a peça pode ser feita com dimensionamentos fora do padrão requerido para sua função.

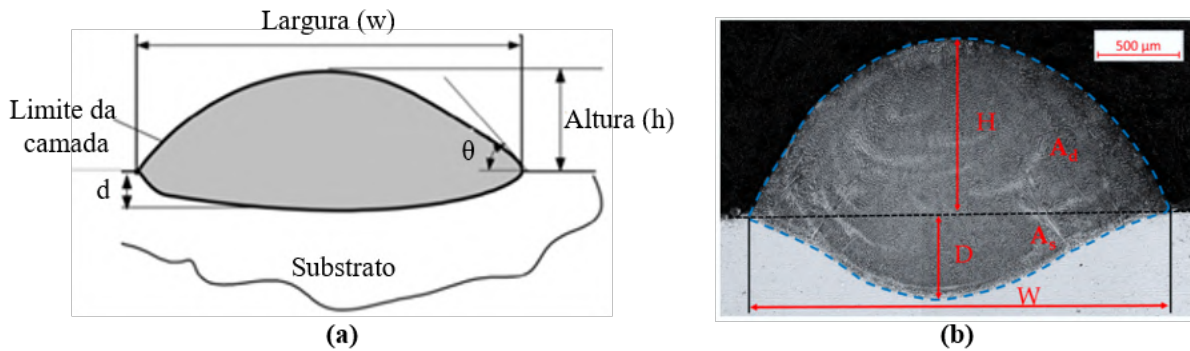
Conforme visto anteriormente, por possuir caráter fundamental em suas questões energéticas (reflexidade), o substrato é um fator crucial nesse processo. No entanto, também é relacionado à geometria da camada depositada (principalmente no que tange às deposições das primeiras camadas e a adesão entre substrato e material depositado). Nesse sentido, segundo [Dass e Moridi \(2019\)](#), para que ocorra a construção de camadas a camadas da peça, é necessário que ocorra a ligação metalúrgica entre o substrato e a primeira camada depositada, quantificado por um parâmetro adimensional denominado, diluição (D), definido pela Equação 2.6:

$$D = \frac{d}{h+d} \approx \frac{A_s}{A_s + A_d} \quad (2.6)$$

Onde: d é a profundidade da poça de fusão abaixo da interface de deposição, h é a altura do material depositado acima da interface, A_s é a área abaixo da interface e A_d é a área acima da interface. Na Figura 17 ainda é possível avaliar outros parâmetros geométricos importantes da camada depositada, como: largura (w) e ângulo de contato (θ). [Wołosz, Baran e Polański \(2020\)](#) citam que a razão entre h e w é designada como “fator de forma” e pode ser mais um fator a ser utilizado para avaliar a forma e geometria das deposições.

Segundo [Dass e Moridi \(2019\)](#), na Figura 18 é apresentada esquematicamente a seção transversal de uma camada depositada e 3 possíveis casos de diluição são analisados: no primeiro (Figura 18 - a), observa-se uma diluição ineficiente devido à falta de fusão entre a camada e o substrato, podendo estar relacionado a uma alta taxa de deposição de pó e/ou baixas energias de entrada. No segundo (Figura 18 - b), verifica-se um nível de diluição bom. No terceiro (Figura

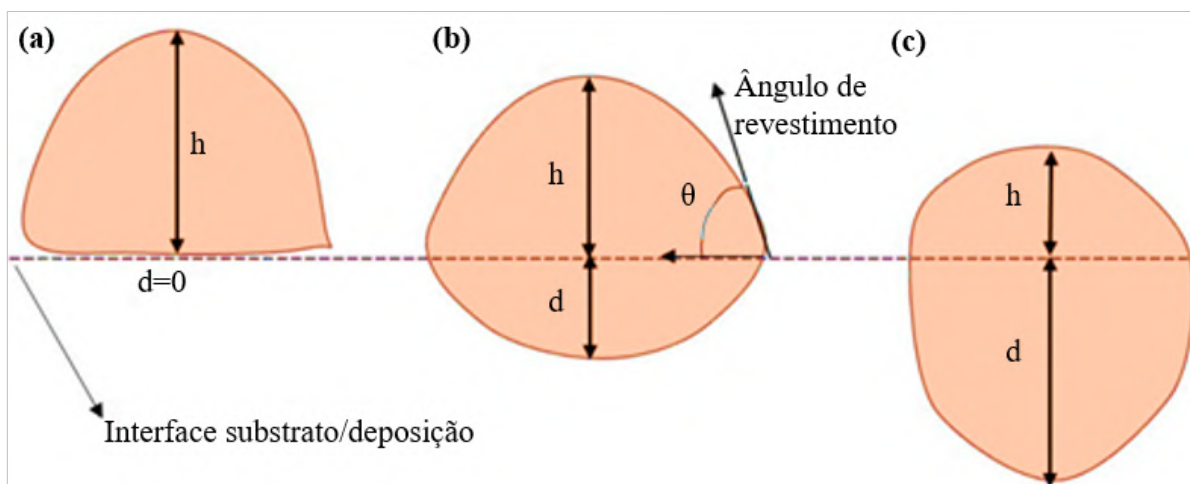
Figura 17 – Parâmetros geométricos obtidos na camada depositada: (a) desenho esquemático e (b) foto.



Fonte: adaptado de Ruiz *et al.* (2018) (a) e Sreekanth *et al.* (2020) (b).

18 - c), nota-se um caso extremo, no qual corresponde a uma alta diluição e ao fenômeno de buraco de fechadura⁴², que pode ter sido causado pela baixa taxa de deposição do pó e/ou altas energias de entrada.

Figura 18 – Casos possíveis de diluição: (a) baixa, (b) adequada e (c) alta.



Fonte: adaptado de Dass e Moridi (2019).

Tais avaliações sobre a forma e geometria das deposições (fatores utilizados para o cálculo da diluição) discutidas anteriormente são válidas para um único cordão de deposição. Todavia, a análise durante a sobreposição camada a camada de material para formação de peças tridimensionais é complexa. Isso ocorre devido ao maior aporte térmico (ciclos térmicos sucessivos) e possibilidade de geração de defeitos entre as camadas (falta de fusão, porosidade, entre outros). Dessa forma, inicialmente, pode se realizar uma investigação do efeito dos parâmetros na geometria de deposição para um único cordão, depois camadas lado a lado e, por fim, sobreposição camada a camada de material, de forma a realizar de forma progressiva adequada na consolidação do componente tridimensional.

⁴² Devido à alta densidade energética do laser, o material pode vaporizar rapidamente e, assim, induzir diminuição da pressão interior que empurra o líquido para baixo, induzindo à deformação e a formação capilar de vapor (ou buraco de fechadura) (COURTOIS *et al.*, 2013).

Além dos fatores acima mencionados, [DebRoy et al. \(2018\)](#) discutem outros parâmetros primários de processo influenciam no processo de DED, sendo esses fundamentais para uma deposição eficiente (ou não), tais como: taxa de fluxo de pó e gases de proteção, espessura e altura da camada depositada e sobreposição de camadas (*overlap*). Adicionalmente, de acordo com [Thompson et al. \(2015\)](#), pode-se citar os seguintes parâmetros e variáveis dimensionais⁴³ número de Marangoni (Ma), relacionado à transferência de calor por convecção (vide Equação 2.7); números de Bond (Bo) e Froude (Fr), relacionados à interação entre líquido/superfície e a morfologia da poça de fusão, podendo Bo ser predito pela forma da poça com base na tensão superficial e forças gravitacionais e o Fr pode ser usado para prever ondas no topo da interface fluídica – definidos pelas Equações 2.8 e 2.9, respectivamente); e, por fim, eficiência de fusão (η_{melt}), podendo ser definida como a razão da energia utilizada para formar a poça de fusão sobre o total de calor gerado a partir da fonte de calor, por um determinado instante no tempo e pode ser correlacionada aos números de Christensen (Ch) e Rykalin (Ry) (definidos pelas Equações 2.10, 2.11 e 2.12, respectivamente). Para uma lista completa, ver [Kahlen e Kar \(2001\)](#); no qual demonstraram que o processo de DED consiste em 19 números/variáveis dimensionais.

$$Ma = \frac{d\gamma}{dT} \frac{dT}{dx} \frac{L^2}{\eta\alpha} \quad (2.7)$$

$$Bo = \frac{\Delta\rho g L^2}{\gamma} \quad (2.8)$$

$$Fr = \frac{v_p^2}{d_p} \quad (2.9)$$

$$\eta_{melt} = \frac{V_b A_m \Delta H_m}{\eta_a P} \approx \frac{Ch}{Ry} \quad (2.10)$$

$$Ch = \frac{V_b^2 A_m}{\alpha^2} \quad (2.11)$$

$$Ry = \frac{\eta_a P V_b}{\alpha^2 h_{LS}} \quad (2.12)$$

Onde: γ é a tensão superficial, $d\gamma/dT$ é o gradiente de tensão superficial, dT/dx é o gradiente de temperatura, L é o comprimento característico, η é a viscosidade da poça de fusão, α é a difusividade térmica, $\Delta\rho$ é a diferença de densidade das duas fases, g é a aceleração da gravidade, v_p é a velocidade da partícula do pó, d_p é o diâmetro da partícula, V_b velocidade de deslocamento do feixe de laser, A_m é a área da seção transversal da poça de fusão, ΔH_m é a

⁴³ A utilização dos parâmetros dimensionais para analisar um problema nos processos de DED é vantajosa, pois remove qualquer dependência de material, máquina ou sistemas extras envolvidos ([THOMPSON et al., 2015](#)).

entalpia de fusão, η_a é a eficiência energética, P a potência do laser e h_{LS} é o calor latente de fusão.

Devido aos diversos parâmetros de processo e condições envolvidos no processo, torna-se difícil a criação de um modelo (THOMPSON *et al.*, 2015), bem como avaliar qual o efeito de cada um desses na qualidade final das peças (em termos microestruturais e propriedades físico-mecânicas), visto que muitos desses não podem ser tomados de forma isolada. Sendo assim, torna-se necessário uma visão holística do processo, aumentando-se a complexidade para tal.

Os processos de DED vêm sendo utilizados com sucesso em diversas aplicações, podendo ressaltar o reparo e remanufatura de componentes, revestimento, multimateriais e materiais gradientes, e manufatura *near-net-shape* (associado à MH). Nesse sentido, Saboori *et al.* (2019) destacam a possibilidade do reparo e remanufatura, em casos industriais, para diversos componentes, como: moldes, matrizes, trilhos, vasos de pressão, virabrequins, eixos de transmissão, pistões, vedação do compressor de turbina a gás, aerofólios e lâminas de turbina, entre outros. De modo exemplificativo do potencial do método para reparo, Bennett *et al.* (2018) compararam o reparo de uma matriz feita por DED e por soldagem. Os resultados apresentados mostraram que a ferramenta reparada pelo DED apresentou a mesma vida útil da original (quando comparado ao reparo tradicional, via soldagem por *Tungsten Inert Gas* (TIG), a vida útil foi reduzida entre 12,5-29,2%). Além disso, o DED conseguiu eliminar a necessidade de reparos emergenciais (diminuindo tempo de inatividade da linha de produção) e menor impacto ambiental quando comparado ao reparo tradicional (via TIG). Das *et al.* (2014) citam que em termos de revestimento, o uso de matérias-primas com propriedades físico-mecânicas superiores às daquelas do substrato pode ser utilizado pelo DED, melhorando o desempenho geral do produto (principalmente àqueles relacionados à resistência ao desgaste, propriedades tribológicas e biocompatibilidade). Hofmann *et al.* (2014) evidenciam as vantagens e possibilidades de usar esse processo para criação de peças com materiais diferentes. Destaca-se a viabilidade de fabricação de produtos *near-net-shape* com a utilização híbrida de DED, associado às operações de usinagem para conferir a qualidade necessária em canais de resfriamento conformais, possibilitando uma maior vida útil da ferramenta (SOSHI *et al.*, 2017). Tais estudos demonstram a viabilidade da aplicação do processo na área acadêmica e industrial, podendo-se ressaltar as mais diversas áreas: aeroespaciais, automotivas, médicas e ferramentarias como beneficiáveis.

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), todas essas aplicações são possíveis, uma vez que o processo é capaz de produzir peças com alta densidade (baixa porosidade), microestruturas singulares e controláveis (ligado diretamente às propriedades físico-mecânicas) e pela viabilidade de utilização de matérias-primas diferentes. Todavia, os autores ressaltam que ainda existem algumas limitações, tais como: baixa resolução (precisão dimensional), qualidade superficial da peça metálica (inferior quando comparada aos processos tradicionais de manufatura) e as velocidades de construção/deposição.

Existem alternativas para superar algumas dessas deficiências, sendo elas por etapas de pós-processamento. Conforme já citado, o pós-processamento de peças metálicas obtidas por MA pode ser classificado em três tipos: usinagem, térmicos e químicos/eletroquímicos (FLYNN *et al.*, 2016). Maleki *et al.* (2021) classificam em quatro grupos: 1) com remoção de material (usinagem), 2) sem remoção de material (no qual se insere os tratamentos térmicos/químicos/eletroquímicos), 3) revestimento (revestimento de hidroxiapatita e anodização são alguns exemplos) e 4) tratamentos híbridos (no qual envolve a combinação de dois ou mais diferentes tratamentos). Em relação aos tratamentos com remoção de material (foco desta pesquisa), pode-se realizar uma sequência de operações de fabricação para alcançar os critérios definidos no projeto. Nesse sentido, vale destacar a melhor sequência dessas etapas de fabricação, sendo elas por MH ou não, visando-se realizar o pós-processamento de modo mais eficiente possível (em termos econômicos, sociais e ambientais) e a depender dos requerimentos funcionais da peça. Tais condições podem ser alcançadas por processos tradicionais de usinagem/acabamento (fresamento e retificação etc) ou por processos avançados de acabamento (MAF e *Magnetorheological Finishing* (MRF) etc)).

Baseado nesse contexto, a aplicação dos processos de usinagem mostrou-se viável e eficiente para a manufatura (e remanufatura) de diversos componentes, todavia, pela natureza e particularidades de cada processo e parâmetros utilizados, cada (pós-)processo entregará a peça com certa qualidade superficial. Sendo assim, ainda existem desafios para serem superados. Conforme já ressaltado, a usinagem convencional é uma solução para melhorar a qualidade de peças obtidas por MA, mas para os processos tradicionais de usinagem/acabamento existem limitações em termos geométricos, dimensionais e qualidade superficial, que podem ser superados por processos avançados de acabamento, como no caso de MAF.

A seguir, características técnicas do MAF serão abordadas, visando definir o processo e seu desenvolvimento histórico, apresentar suas aplicações, explorar os fenômenos/parâmetros envolvidos e vantagens/limitações, de forma a evidenciar os mecanismos e condições que governam o processo e como ele pode ser utilizado para incrementar a qualidade superficial das peças produzidas por MA.

2.3 MAF

Esta Seção foi dividida em três principais itens. 1) Visa-se uma breve exposição do desenvolvimento histórico do processo de MAF, aplicações e descrição de conceitos e mecanismos fundamentais. 2) Análise técnica dos artigos que envolvem o pós-processamento por MAF de peças feitas por MA serão abordados. 3) Por fim, descrição teórica dos modelos do processo de MAF serão discutidos.

2.3.1 *Desenvolvimento e conceitos fundamentais*

Em termos de definição, segundo Jain (2008), os processos de acabamento são divididos em duas categorias: tradicionais (retificação, lapidação) e avançados (MAF, MRF), sendo estes últimos, classificados de acordo com a energia utilizada para remoção de material, podendo ser mecânico, termoelétrico e eletroquímico/químico. Segundo o autor, o processo de MAF faz o uso de campo magnético/elétrico para controlar as forças que atuam nas partículas abrasivas para remoção de material, sendo, portanto, classificado como um processo de acabamento assistido por campo magnético. Kumar, Singh e Srivastava (2016) citam que o campo magnético nesse processo pode ser induzido por três diferentes maneiras (ímãs permanentes, corrente alternada ou direta) e o primeiro caso é o mais estudado entre eles. Nesse sentido, pode-se ressaltar que o controle das forças por meio das dimensões e tipo dos ímãs utilizados, bem como a disposição geométrica desses no dispositivo, afeta o desempenho do processo. Dessa forma, neste estudo, utilizar-se-á ímãs de neodímio (Nd-Fe-B) para geração do campo magnético e, conseqüentemente, forças magnéticas para usinagem.

Em relação ao desenvolvimento histórico, a primeira patente relacionada ao processo de MAF foi concedida nos Estados Unidos da América (EUA), em 1929, para o polimento de matrizes de trefilação (SIMONS, 1929). Na sequência, em 1940, outra patente foi outorgada nos EUA, com base nos mesmos princípios, para a limpeza ou polimento de interiores de barris (COATS, 1940). Até meados da década 1970, várias pesquisas foram conduzidas na Europa e na ex-União Soviética, referentes ao processo de MAF (BARON, 2008). Na década de 1980, Prof. Shinmura e seu time levaram conhecimento sobre o tema, da Bulgária para o Japão, onde várias pesquisas foram desenvolvidas (SHINMURA *et al.*, 1990). Na década posterior, várias colaborações entre os pesquisadores foram feitas para o desenvolvimento da técnica nos EUA (FOX *et al.*, 1994). Desde então, abordagens inovadoras foram desenvolvidas tanto na academia quanto na indústria, abordando pesquisas teóricas e experimentais para desenvolver novos fundamentos, métodos, ferramentas, abrasivos, entre outros componentes de modo a explorar novas possibilidades de aplicações.

Em relação às aplicações, o MAF pode ser usado para melhorar a qualidade superficial (SHINMURA *et al.*, 1990; FOX *et al.*, 1994), remover rebarbas⁴⁴ (KODÁCSY; SZABÓ, 2014; KO; BARON; PARK, 2007), alterar as propriedades hidrodinâmicas da superfície (por exemplo - molhabilidade (GRAZIANO *et al.*, 2012; GRAZIANO *et al.*, 2014) e adesão celular (BOGGS *et al.*, 2014)), propriedades tribológicas (por exemplo - desgaste (KANISH *et al.*, 2018) e coeficiente de fricção (LI *et al.*, 2016)), propriedades ópticas (por exemplo - reflexão de luz (RIVEROS *et al.*, 2013)), entre outros. Sendo aplicado nas mais diversas indústrias, como na aeroespacial (WANG; HU, 2005), médica (ALTAREVA *et al.*, 1992), militar (KAJAL *et al.*, 2017), ferramentaria (YAMAGUCHI *et al.*, 2012), etc. Tais aplicações devem-se a possibilidade

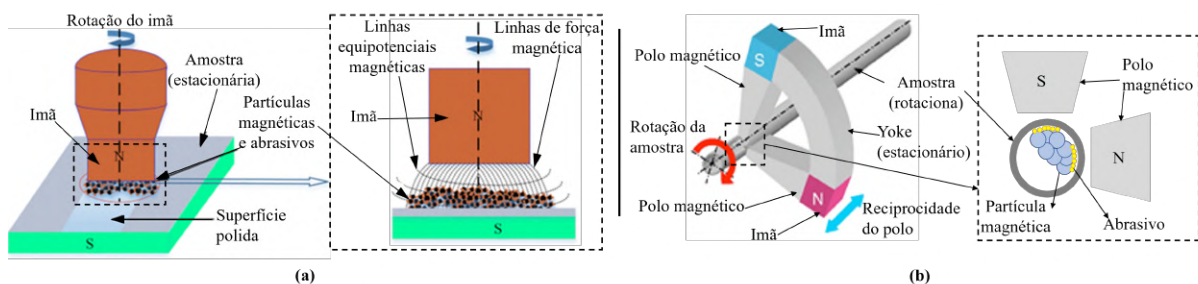
⁴⁴ Quando o MAF é utilizado especificamente para rebarbação, este recebe o nome de *Magnetic Abrasive Deburring* (MAD) (KODÁCSY; SZABÓ, 2014).

de geração de elevada qualidade superficial sem causar danos à peça, aumentando assim a longevidade do produto e sua funcionalidade.

Jain (2008) ressalta que o processo de MAF pode gerar peças com elevada qualidade superficial (R_a próximo de 8 nm) e sem defeito (sub ou superficial). Além disso, pode ser utilizado para remoção de rebarbas, melhorando as tolerâncias dimensionais e geométricas da peça, a depender dos critérios de projeto. Aurich *et al.* (2019) destacam que o MAF é aplicável para manufaturar micropeças e microestruturas, de modo a atender os requisitos de manufatura de produtos miniaturizados. No entanto, os autores ressaltam que apesar de muitos grupos de pesquisa terem demonstrado a viabilidade da utilização do MAF em diversas áreas, alguns desafios para aplicação desse procedimento na prática (indústria), ainda precisam ser superados. Os autores salientam que a realização prática é prejudicada pela falta de modelos que possam prever com precisão a taxa de remoção de material e a rugosidade final das peças, e caso essa limitação seja alcançada poder-se-ia levar à implementação industrial do processo.

No tocante aos princípios físicos, de acordo com Yang e Li (2018), MAF é um processo no qual certa quantidade de partículas abrasivas e partículas ferromagnéticas são homogeneamente misturadas⁴⁵ para criar as partículas magnéticas abrasivas (do inglês, *magnetic abrasive particles* - MAPs) e são unidas por campos magnéticos entre os polos magnéticos e a peça, onde estão sendo exercidas forças magnéticas entre estes componentes. Por meio dos movimentos relativos e das forças envolvidas entre estes, ocorre-se a remoção de material da peça (usinagem). Deste modo, as características geométricas do componente são alteradas (valores de rugosidade decrescem – podendo chegar à níveis nanométricos – e rebarbas são removidas), fornecendo assim uma melhora na qualidade e integridade da superfície usinada. Na Figura 19 é apresentado um esquemático do processo para polimento de amostras planas e cilíndricas (superfície interna).

Figura 19 – Esquema do princípio de processamento por MAF de superfícies planas (a) e cilíndrica interna (b).



Fonte: adaptado de Heng, Kim e Mun (2017) (a) e Yamaguchi, Shinmura e Ikeda (2007) (b).

Segundo Heng, Kim e Mun (2017), o processo de MAF pode ser feito com dois tipos de MAPs (também denominados de ferramentas): soltos (não ligados) ou fixos (conectados por um ligante). Em relação ao primeiro, os MAPs formam uma escova magnética abrasiva flexível (do

⁴⁵ Houshi (2016) citam óxido de alumínio (Al_2O_3), carbeta de silício (SiC), cBN e diamante como exemplos de partículas abrasivas e granalhas de ferro e aço como partículas ferromagnéticas comumente utilizadas no processo.

inglês, *magnetic abrasive flexible brush - MAFB*)⁴⁶ que age como uma ferramenta com múltiplos cortes para o acabamento da superfície. Já em relação ao segundo tipo, é feita uma mistura dos componentes (abrasivos e partículas ferromagnéticas) com um ligante; daí a ferramenta é prensada e preparada por sinterização para o seu uso (assemelhando-se a um rebolo utilizado na retificação). Segundo os autores, o processo MAF com MAPs soltos produz uma maior taxa de remoção de material, enquanto as ferramentas ligadas produzem um melhor acabamento superficial. Adicionalmente, conforme experimentalmente demonstrado por Yamaguchi *et al.* (2015), é possível construir ferramentas híbridas, que possuem ambas as fases.

Segundo Yang e Li (2018), existem cinco principais efeitos que agem nos mecanismos de remoção de material, sendo eles:

- **O efeito do microcorte e extrusão:** pelo movimento relativo entre os abrasivos⁴⁷ e a peça, e a ação conjunta das forças magnéticas, os MAPs (com dureza mais elevada que a peça) possuem efeito de corte e extrusão na superfície, alterando o estado inicial da peça (rugosidade, qualidade dimensional, rebarba, tensão residual). Além disso, quando se utiliza abrasivos soltos (não conectados por um ligante) para formar o MAFB e devido à distribuição desigual do campo magnético, a ação de cada MAP faz com que ocorra um corte aleatório e descontínuo. Adicionalmente, devido à irregularidade geométrica das peças, as faces de ataque da aresta de corte possuem um ângulo de inclinação negativo e profundidade de corte muito pequena (menor que 1 μm), o que resulta no microcorte.
- **O efeito do desgaste por deformação plástica múltipla:** o metal da superfície irá gerar deformação plástica ou deformação plástica múltipla, quando o grau de deformação plástica excede o limite plástico de deformação permitido pelo material. Quatro são os fatores que afetam esse item: a forma geométrica das MAPs não ser afiada (arredondada), as faces dos abrasivos tocarem a superfície da peça ao invés do gume de corte voltado para a direção do movimento, ângulos de inclinação negativos e corpo de prova com material com muita plasticidade. Além de os micrométricos cavacos removidos da peça caírem na região de contato e se transformarem em pó abrasivo, resultando em interações de abrasão e raspagem.
- **Os efeitos do atrito, corrosão e desgaste:** os efeitos das MAPs na superfície também se incluem os fenômenos de deslizamento e fricção, chamados de efeitos de atrito. A depender das interações químicas no local de contato, pode ocorrer um desgaste corrosivo superficial e pelo movimento relativo entre as MAPs e a peça, ao se expor uma nova superfície ao meio ambiente, pode-se formar um filme de óxidos extremamente fino sobre

⁴⁶ Os MAPs são unidos magneticamente devido à interação dipolo-dipolo entre os polos magnéticos ao longo da linha de força, geralmente com espessura variando entre 1 e 3 mm (JAIN, 2009).

⁴⁷ As características desejadas para o grão abrasivo em processos que utilizam esses componentes são alta dureza e tenacidade, resistência ao desgaste, alta resistência térmica/química e friabilidade (capacidade de expor novas arestas ativas durante o corte) (KLOCKE, 2009; GROOVER, 2010).

a peça. Na continuidade do processo, a depender da temperatura envolvida e coeficiente de expansão do filme de óxido e do material da peça, esse filme é desgastado e a peça é descascada constantemente, melhorando os efeitos do acabamento e aumentando a eficiência de remoção de material.

- **Os efeitos do desgaste eletroquímico:** a rotação da peça entre os polos magnéticos produzirá um efeito de excitação alternada que favorece o desgaste eletroquímico da peça.
- **O efeito do meio abrasivo:** a adição de elementos (grafite, parafina líquida, óleo de silicone) no meio abrasivo (*slurry*), pode promover os efeitos de acabamentos a fim de melhorar a qualidade superficial das peças (como, brilho, cor, rugosidade) ou pode reduzir os impactos na qualidade do acabamento (pela redução de calor na região de contato).

Vale ressaltar que em termos dos mecanismos de remoção de material, as características físico-químicas das partículas abrasivas e ferromagnéticas possuem influência direta na sua vida útil e, conseqüentemente, no desempenho da taxa de remoção de material, qualidade superficial da peça e tempo/custo de processamento. Nesse sentido, o próprio desgaste das MAPs ao longo do processo também tem influência nessas características. De acordo com [Yang e Li \(2018\)](#), as MAPs podem sofrer falha pelos fenômenos de desgaste por abrasão (perda da capacidade de corte da aresta - causado por atrito mecânico ou efeito térmico), desgaste por esmagamento (força resultante excede à tensão última do material e resistência à fadiga, esmagando-a), desgaste por esfoliação (forças externas excedem às forças de adesão – no caso de MAPs fixas) e absorção de microcavacos na fase da MAPs (piorando a qualidade da peça).

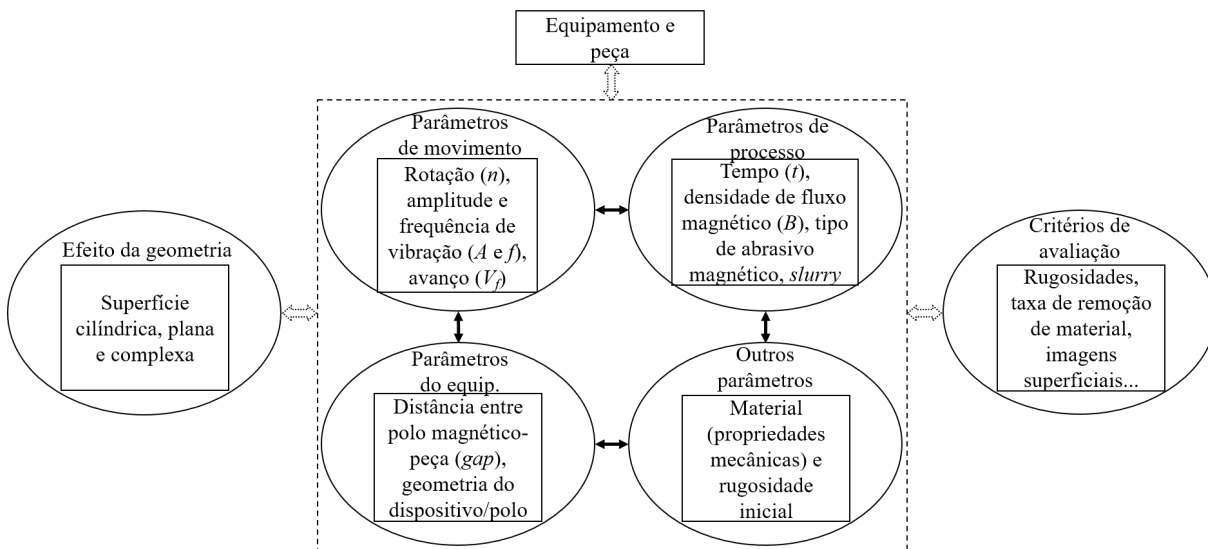
Dessa forma, fica claro que os mecanismos e condições que governam o meio de remoção de material são complexos e dependentes de vários fatores físico-químicos. Entendê-los e compreender seus efeitos no processo de acabamento da peça, torna-se fundamental para a realização de um procedimento eficiente.

Em relação aos parâmetros do processo, [Heng, Kim e Mun \(2017\)](#) identificaram as partículas abrasivas e ferromagnéticas, dispositivo magnético, fluido, distância entre peça e polo magnético e velocidade de rotação⁴⁸ como as principais variáveis de entrada. Em relação às variáveis de saída, os principais são rugosidade, material removido e precisão dimensional. [Khattri et al. \(2018\)](#) realizaram uma visão geral de cada um desses parâmetros críticos de entrada do processo e como eles afetam a qualidade superficial e a taxa de remoção de material. Na Figura 20 é apresentada as principais variáveis que afetam o processo e sua inter-relação.

Em relação às partículas abrasivas e ferromagnéticas, [Singh, Khangura e Mishra \(2010\)](#) avaliaram como as diferentes maneiras de manufatura dos pós (sinterizado, ligado, plasma, gel, entre outros) utilizados para formar os MAPs afetam o processo de MAF, sendo que as peças usinadas por MAPs sinterizados apresentaram os melhores níveis de acabamento superficial.

⁴⁸ [Jain et al. \(2001\)](#) concluíram que a distância entre peça-polo magnético (entreferro) e velocidade de rotação são parâmetros com influência na taxa de remoção de material e rugosidades.

Figura 20 – Principais variáveis do MAF.



Fonte: adaptado de Yang e Li (2018).

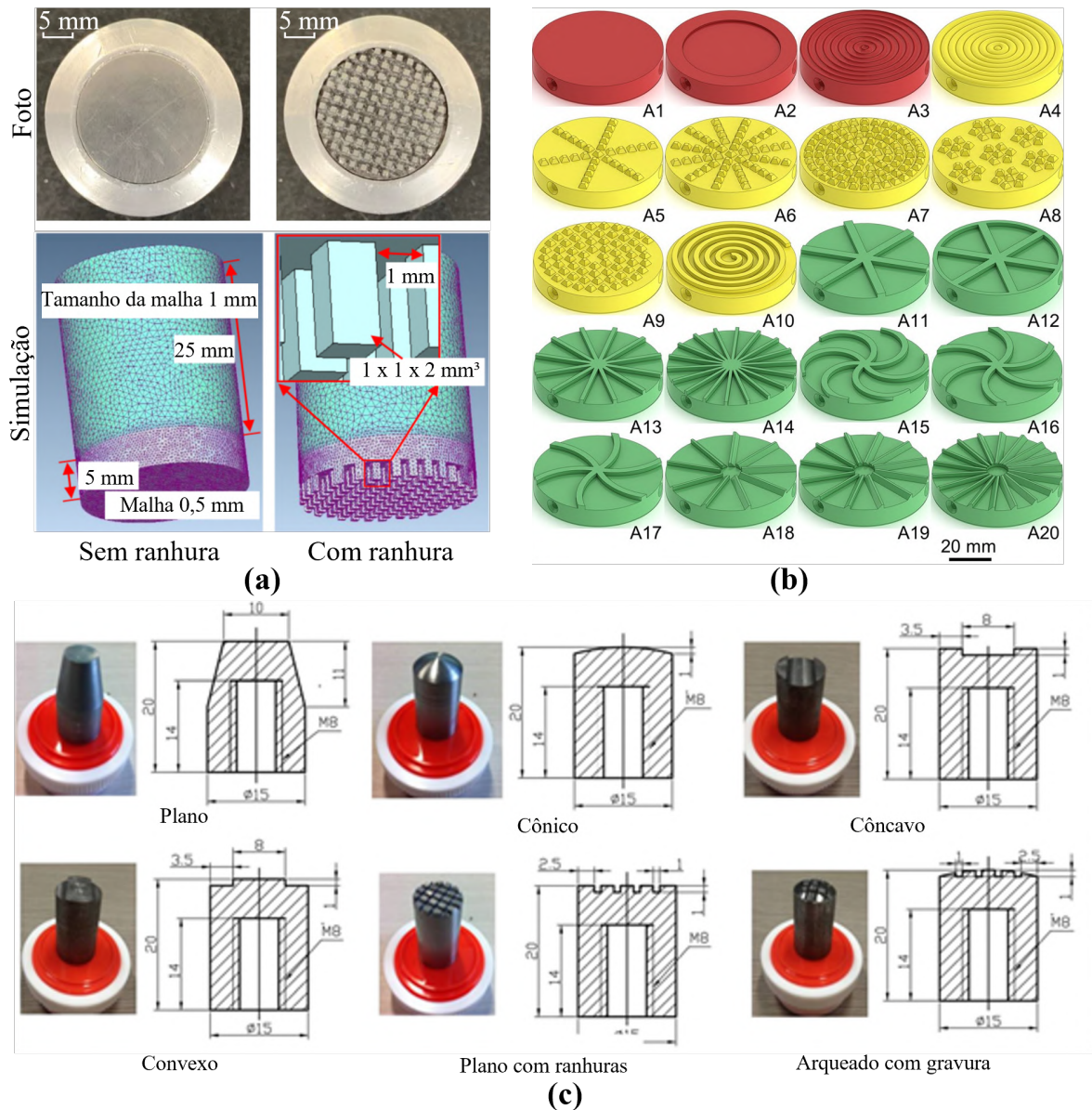
Jayswal, Jain e Dixit (2005) concluíram que o diâmetro das MAPs e a intensidade do fluxo magnético estão proporcionalmente ligados à qualidade superficial.

No tocante ao dispositivo magnético⁴⁹, Jayswal, Jain e Dixit (2005) ressaltaram que a presença de ranhuras/canais no polo magnético aumenta as forças magnéticas e, consequentemente, a pressão de usinagem e a eficiência do processo. Zou, Xie e Zhang (2020) compararam a eficiência do polimento com o uso de polo magnético liso e com ranhuras de geometria de $1 \times 1 \times 2 \text{ mm}^3$ e espaçamento de 1 mm entre eles (conforme Figura 21 (a)). Os resultados gerados pelos polos com ranhuras apresentaram maior uniformidade e retilidade da superfície. Zelinko *et al.* (2022) testaram 20 diferentes estruturas de cobertura superior que podem ser utilizados acoplados ao ímã. Estruturas ferromagnéticas lisas piramidais, onduladas, espirais, entre outros atuaram como polos magnéticos sem barreiras, barreiras contínuas e descontínuas (Figura 21 (b)). As amostras polidas com as estruturas que geraram barreiras (contínuas e descontínuas) foram as que apresentaram melhor qualidade superficial. Wu *et al.* (2019) verificaram o efeito de 6 diferentes formatos de polo magnético (Figura 21 (c)) no desempenho do processo de MAF e concluíram que o polo arqueado com ranhuras apresentou maior densidade de fluxo magnético e maior uniformidade dentre todos os tipos. Dessa forma, utilizar ranhuras ou protuberâncias no polo magnético pode ser uma solução viável para aumentar o desempenho do processo e, consequentemente, minimizar o tempo de processamento.

Em termos de fluido, Natsume, Shinmura e Yamaguchi (2003) ressaltam que as forças de usinagem são afetadas pelas características físico-químicas do lubrificante, sendo que aqueles que possuem baixo coeficiente de fricção possuem um efeito de estabilização do movimento das partículas, cancelando o efeito do formato da partícula, podendo prejudicar o corte. Amorim

⁴⁹ Yang e Li (2018) apresentam dispositivos com diversos formatos e configurações geométricas, sendo usados para superfícies planas, cilíndricas e complexas.

Figura 21 – Exemplos de diferentes formatos de polo magnético.



Fonte: adaptado de [Zou, Xie e Zhang \(2020\)](#) (a), [Zelinko et al. \(2022\)](#) (b) e [Wu et al. \(2019\)](#) (c).

(2009) analisou a influência do elemento aglutinante (com 5 diferentes tipos de óleos parafínicos) e sua proporção para formação da pasta, e concluiu que, em geral, a concentração é inversamente proporcional ao desempenho do processo e a viscosidade é proporcional à qualidade da peça (baixa-pior acabamento). Pode-se citar também o efeito da presença de elementos aditivos para formação da pasta abrasiva e, conseqüentemente, lubrificação da região de contato. No artigo preliminar de [Lee et al. \(2018\)](#), os autores utilizaram lubrificante sólido (*hexagonal boron nitride* - hBN) em nanoescala no *slurry* e, em alguns casos, a qualidade da superfície foi melhorada, mas em outras ocorreu adesão das partículas abrasivas na amostra. [Fan et al. \(2020\)](#) realizam experimentos de MAF com fluidos na presença de aditivos não Newtonianos em diferentes concentrações e concluíram que os aditivos foram eficientes para redução da rugosidade (R_a) da

peça de Ti-6Al-4V até o valor de 54 nm.

Pode-se concluir que vários são os fatores que afetam o desempenho do processo de MAF. A rotação da ferramenta (relacionada à velocidade de corte) e o tipo e tamanho do abrasivo podem ser selecionados com base no material da peça a ser polida, taxa de remoção de material desejada, rugosidade, textura da superfície, propriedades tribológicas, entre outros. No entanto, na prática, uma abordagem de tentativa e erro é frequentemente usada para definição dos parâmetros e condições. Dessa forma, a escolha adequada dos parâmetros deve ser feita de maneira criteriosa e de modo a ponderar sobre objetivos conflitantes, como por exemplo, tempo de processamento e custo de operação, a depender das condições desejadas da peça a ser manufaturada. Essa elevada possibilidade de variação nos parâmetros de entrada do processo também é responsável pela viabilidade em diferentes tipos de aplicações.

As vantagens do processo de MAF, em relação aos processos tradicionais, são, principalmente, a possibilidade do controle das forças durante o processo (intimamente relacionado com a taxa de remoção de material, tempo de processamento e qualidade superficial da peça), aplicável em peças com diferentes geometrias (plana, cilíndrica e complexa), operação relativamente simples e econômica, e ambientalmente eficiente (HOUSHI, 2016). Todavia, Heng, Kim e Mun (2017) ressaltam que algumas limitações ainda precisam ser superadas, como: baixas taxas de remoção de material quando comparado a outros processos não tradicionais de usinagem e, conseqüentemente, elevado tempo de processamento.

Para superar tais desafios, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas, principalmente relacionadas aos processos (especialmente aqueles envolvidos com a hibridização - nesse caso, ocorre a associação do campo magnético com mais uma fonte de energia, como química, eletroquímica, ultrassom), grãos abrasivos (modificando-se suas características, formas e propriedades físico-mecânicas), ferramentas (que possibilitem a alteração do campo magnético), modelos (que permitam prever com precisão a taxa de remoção de material e rugosidade), entre outros desenvolvimentos que propiciem uma maior eficiência ao processo.

Pelos princípios do processo MAF, pode-se concluir que sua utilização se dá quando o componente necessita de alta precisão dimensional e qualidade superficial. Sendo assim, pode ser um processo de pós-processamento utilizado em peças metálicas produzidas por MA, principalmente por DED, que pode ser utilizado em máquinas híbridas (*in-situ*) ou em centros de usinagem adaptados (*ex-situ*), possuindo desafios científicos e tecnológicos relacionados a este tipo de manufatura.

Até o momento da revisão sistemática da literatura, o pós-processamento por MAF de metais e polímeros fabricados por MA já foi utilizado com sucesso por dezesseis referências (seis com foco no aço 316L) indexadas nas bases de dados Scopus e Web of Science, conforme será apresentado a seguir.

2.3.2 Pós-processamento via MAF de peças feitas por MA

Inicialmente, serão apresentados os estudos referentes ao pós-processamento de amostras do aço inoxidável 316L fabricados por MA. Na sequência, o polimento de outros materiais produzidos por MA serão discutidos.

Yamaguchi, Fergani e Wu (2017) analisaram o impacto do processo MAF na rugosidade e na tensão residual de componentes metálicos (aço 316L) fabricados por SLM. A alteração da rugosidade foi realizada em três condições, polimento grosso (A), médio (B) e fino (C), por meio do processo denominado de *magnetic field-assisted polishing* - MAP_{ol}. A alteração da tensão residual foi realizada em uma condição, por meio do processo denominado de *magnetic field-assisted burnishing* - MAB_{ur}. Em relação aos resultados do MAP_{ol}, os autores concluíram que a rugosidade R_z foi minimizada de 102,1 μm (valor inicial) para 0,1 μm (após condição C, num total de 240 min de processamento), demonstrando a elevada capacidade de polimento para alteração da funcionalidade superficial de amostras produzida por MA. Além disso, o processo MAB_{ur} induziu tensão residual de compressão na superfície dos componentes.

Wu e Yamaguchi (2018) avaliaram os mecanismos de remoção de material do MAF e seu impacto na superfície de peças metálicas (aço 316L) produzidas por SLM, por meio de duas configurações: 1) modificando o tamanho das MAPs, sendo utilizadas partículas grandes (ferramenta rígida) e partículas pequenas (ferramenta flexível); 2) modificando o tipo de abrasivo: magnético ou convencional. Em relação ao tamanho das MAPs, os autores concluíram que o uso de partículas maiores facilitam a remoção dos picos da superfície e o uso de partículas menores facilitou a remoção de material ao longo de toda a superfície do componente. No tocante ao tipo de abrasivo, os autores concluíram que as partículas magnéticas produzem uma superfície com maior *skewness* (R_{sk}) e menor curtose (R_{ku}) quando comparada àquela produzida pelos abrasivos convencionais.

Zhang *et al.* (2018) utilizaram o processo de MAF para polir peças de aço inoxidável 316L, fabricados por SLM, em dois ângulos de deposição (vertical – 0°, e horizontal - 90°), com foco na avaliação da rugosidade e morfologia superficial. Foi usado apenas granalha de aço (G50 - $\varnothing 500 \mu\text{m}$) como partícula magnética, tendo formato irregular com arestas afiadas para alteração da superfície. A R_{a0} (após SLM) em 0 e 90° eram de 12,05 e 8,16 μm , respectivamente, e foram reduzidas para 2,68 e 3,97 μm , após 75 min de operação, indicando que a amostra depositada verticalmente possui uma melhor capacidade de polimento do que aquela depositada horizontalmente. A morfologia superficial demonstrou qualitativamente que a superfície foi alterada, contendo inicialmente muitos grãos semifundidos (típico de operações de MA) e, após o MAF, novas texturas superficiais foram geradas, melhorando a qualidade superficial. Todavia, nota-se a presença de poros na amostra.

Zhang, Chaudhari e Wang (2019) expandiram o estudo supracitado para outros ângulos de deposição, incluindo 15, 30, 45, 60 e 75°, além de 0 e 90°. Os resultados comprovaram

que a estratégia de deposição é um fator dominante na rugosidade inicial (R_{a0}) da peça, com um aumento de 0 até 60° e uma redução após esse valor, sendo 90° (horizontal) o que gerou menor R_{a0} . A maior taxa de redução de rugosidade ocorreu para a peça depositada em 0°, tendo reduzido de uma R_{a0} de 12,44 μm para 2,85 μm , após 75 min de operação. Os autores também desenvolveram um modelo analítico da taxa de remoção de material que correlaciona a rugosidade com a profundidade de indentação dos abrasivos no processo de MAF.

Wu *et al.* (2020) analisaram o efeito da estratégia de construção sobre os resultados do processo de MAF (rugosidade, dureza e tensão residual), em peças (discos) de 316L feitos por SLM. Três direções de construção foram analisadas, sendo elas: horizontal (H), vertical paralelo ($V_{//}$) e vertical perpendicular (V_{\perp}). Quatro condições experimentais foram testadas, duas com foco na modificação da rugosidade (denominado MAP_{ol}) e duas com foco na alteração da tensão residual (denominado MAB_{ur}). Em relação aos resultados do MAP, as rugosidades iniciais (R_{z0}) dos discos H , $V_{//}$ e V_{\perp} eram de 80,6, 59,6 e 67,4 μm , respectivamente, e foram reduzidas para próximos de 3 μm (a condição H levou 105 min para alcançar esse valor, enquanto as demais levaram apenas 45 min). Tal discrepância no tempo de processamento deu-se pela maior R_{z0} da amostra H , além de uma maior dureza e não homogeneidade causada pelas condições de deposição. Tais resultados indicam que a estratégia de construção tem impacto nas propriedades da peça, o que influencia na capacidade e características do polimento. Independente das condições de construções, o MAB_{ur} mostrou-se eficiente para induzir endurecimento por deformação nas superfícies, aumentando assim a dureza e, em alguns casos, foi possível alterar a tensão residual de tensão para compressão.

Zhang e Wang (2022) exploraram o processo de acabamento interno acionado magneticamente (do inglês, *magnetically driven internal finishing* - MDIF) para melhorar a qualidade superficial dos tubos de 316L SS produzidos por L-PBF. O MDIF usa uma ferramenta de polimento (esferas de ímã permanente com revestimento abrasivo) em vez de partículas abrasivas magnéticas (MAPs) – o processo foi desenvolvido e relatado pela primeira vez por Zhang *et al.* (2020). Inicialmente, três condições experimentais de MDIF foram testadas, sendo elas: ponto único, linha e seção. Na sequência, foi realizado uma comparação do MDIF com o processo convencional de MAF (utilização de partículas abrasivas/magnéticas para formar a escova abrasiva flexível). Em relação aos resultados do MDIF em ponto, a rugosidade inicial (11,59 μm R_a) foi reduzida em 10 min para 0,38 μm R_a . Para o MDIF em linha, as rugosidades S_a e S_z foram reduzidas em 108 s de 11,70 \pm 2,22 e 87,07 \pm 18,10 μm para 1,22 \pm 0,20 e 17,57 \pm 4,81 μm , respectivamente. Em relação aos resultados de MDIF em seção, as rugosidades R_a e R_z foram reduzidas após o segundo passe (total de 36 min) de 10,63 \pm 2,02 e 62,38 \pm 10,81 μm para 0,81 \pm 0,09 e 4,96 \pm 0,45 μm , respectivamente, indicando uma redução de rugosidade superior a 92%. Por fim, o MAF foi realizado em duas condições. Na primeira (*gap* de 2 mm), a rugosidade final alcançada após 16 min de polimento foi de 7,04 μm R_a . Já na segunda (*gap* de 0,5 mm), a rugosidade foi de 6,32 μm R_a . Sendo assim, de forma comparativa, a eficiência em termos de aumento da qualidade superficial pela ferramenta no MDIF foi superior aos MAPs no MAF,

fornecendo uma alternativa viável para polimento interno de peças cilíndricas produzidas por MA.

Os exemplos mencionados anteriormente demonstram a viabilidade da utilização do MAF em peças de aço inoxidável 316L produzidas por MA, com resultados promissores. Na Tabela 15 é apresentada uma comparação dos parâmetros e condições usados nos artigos supracitados. Nota-se que apenas o processo de SLM foi aplicado para o pós-processamento desse metal. Majoritariamente, os estudos focaram em polir superfícies planas e apenas um estudo abordou o pós-processamento de peças cilíndricas. Ainda existe uma lacuna de pesquisa para o pós-processamento via MAF de peças metálicas com geometria complexa, fabricadas por MA. Além disso, amostras manufaturadas por outras técnicas de deposição (como o DED) não foram reportadas na literatura para o polimento por MAF. Observa-se também que a geração do campo magnético (consequentemente, forças magnéticas para usinagem) foi realizada exclusivamente por meio de ímãs permanentes, que também será utilizado neste estudo. Vale ressaltar que a variação de rugosidade (ΔR) varia entre de 67,8 até 99,9%, mostrando a capacidade do processo em alcançar rugosidades nanométricas (em alguns casos, extremamente raros/difíceis de serem alcançados por meio de processos tradicionais de usinagem). Nesse sentido, destaca-se além da rugosidade em níveis nanométricos, alteração da funcionalidade superficial, por meio da possibilidade de indução de tensão de compressão nas amostras, alteração do desempenho tribológico, com superfícies livres de danos observáveis e sem deformação. Todavia, para alcançar tais níveis, algumas vezes, são necessários elevados tempos de pós-processamento, o qual pode ser reduzido por meio de operações intermediárias (como no caso do fresamento e/ou retificação). Embora as reduções de rugosidade sejam altas (até 99,9%), foi necessário um longo tempo de processamento para tal redução (até 4 horas). O acabamento superficial não serve apenas para melhorar a rugosidade de uma peça. Ele permite atender às especificações da peça alterando as condições da superfície (incluindo geometria (por exemplo, rugosidade e textura)), propriedades mecânicas (por exemplo, tensão residual), composições químicas, desempenho tribológico e assim por diante. A eficiência de acabamento, como taxa de remoção de material e tempo necessário para produzir a superfície desejada usando MAF, também é importante em aplicações práticas. Além disso, os materiais e os métodos de fabricação evoluem para corresponder aos estilos de vida e requisitos da sociedade atual (sendo constantemente alterados), e as tecnologias de acabamento de superfície, como o MAF, devem evoluir junto com as mudanças de produção. Assim, os pesquisadores estão constantemente avançando no MAF.

Tabela 15 – Comparação dos parâmetros e condições usados nos processos de MAF para o pós-processamento de peças de 316L feitas por MIA.

Ref.	Perfil polido	Processo de MA	MAPs	Condições do MAF			Rugosidade (μm)		
				Parâmetros	Tempo (min)	R_{a0} (R_{z0})	R_{af} (R_{zf})	ΔR_a (ΔR_z) (%)	
Yamaguchi, Fergani e Wu (2017)*A	Plana	SLM	Granalha de aço, partícula de Fe ($\varnothing 80 \mu\text{m}$), abrasivos (alumina - $\varnothing 10 \mu\text{m}$ e diamante - $\varnothing 120 \mu\text{m}$), óleo solúvel	Imã Nd-Fe-B, V_f 60 mm/min, n 600 rpm, gap 3-2 mm	240	(102,1)	(0,13)	(99,9)	
Wu e Yamaguchi (2018)*B	Plana	SLM	Granalha de aço, partícula de Fe ($\varnothing 80 \mu\text{m}$), abrasivos (alumina - $\varnothing 10 \mu\text{m}$ e dia. - $\varnothing 120 \mu\text{m}$), óleo solúvel	Imã Nd-Fe-B, V_f 60 mm/min, n 600 rpm, gap 3-2 mm	15	≈ 23 (80)	≈ 3 (8)	87,0 (90,0)	
Zhang <i>et al.</i> (2018) [‡] C	Plana	SLM	Granalha de aço ($\varnothing 500 \mu\text{m}$)	Imã Nd-Fe-B (com vibração)	75	12,05 (67,76)	2,68 (21,79)	77,8 (67,8)	
Zhang <i>et al.</i> (2019) [‡] D	Plana	SLM	Granalha de aço ($\varnothing 500 \mu\text{m}$)	Imã Nd-Fe-B (com vibração)	75	12,44 (72)	2,85 (20)	77,1 (72,2)	
Wu <i>et al.</i> (2020) [#] E	Plana	SLM	Granalha de aço ($\varnothing 700 \mu\text{m}$), partícula de Fe ($\varnothing 80 \mu\text{m}$), abrasivo (alumina - $\varnothing 10 \mu\text{m}$ e dia. - $\varnothing 120 \mu\text{m}$), óleo solúvel	Imã Nd-Fe-B, V_f 60 mm/min, n 600 rpm, gap 2 mm	105	(80,6)	(3)	(96,3)	
Zhang e Wang (2022)F	Cilíndrica interna	SLM	Imã permanente revestido com abrasivo de SiC \diamond	Imã Nd-B (G50), V_f 500 mm/min, n 1000 rpm, gap 32 mm	32	10,63 (62,38)	0,81 (4,96)	92,4 (92,0)	

*Condições do experimento 1. [§] A R_{a0} após SLM ($\approx 7 \mu\text{m}$) foi reduzida por retificação para $0,6 \mu\text{m}$. [‡] Resultados da amostra depositada verticalmente (0°).

[#]Condições do experimento A e amostra depositada horizontalmente (H). \diamond O MDIF utiliza essa ferramenta abrasiva em vez de MAPs.

A=Yamaguchi, Fergani e Wu (2017), B=Wu e Yamaguchi (2018), C=Zhang *et al.* (2018), D=Zhang *et al.* (2019), E=Wu *et al.* (2020), F=Zhang e Wang (2022).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência, o polimento por MAF de outros materiais produzidos por MA serão discutidos.

Conforme já mencionado, [Guo *et al.* \(2018a\)](#) utilizaram a retificação como uma das operações de pós-processamento, no polímero Poliamida 12 (PA12) produzidas por SLS, avaliando os danos superficiais e subsuperficiais (morfologia da superfície, rugosidade e dureza). Após a retificação, o processo de MAF foi realizado com o intuito de melhorar a qualidade superficial das peças. O MAF foi realizado com uma rotação de 400 rpm, velocidade de 288 mm/min, distância entre a ferramenta e a amostra (*gap*) de 2,5 mm, com um pó abrasivo de Al_2O_3 de 5 μm de tamanho de grão. Por meio de microscopia ótica pode-se verificar as marcas dos grãos abrasivos na superfície da peça, sem a presença de cavacos aderidos, além da presença de poros (devido à deposição). Em relação às rugosidades, inicialmente, as peças manufaturadas por SLS tinham uma R_a de aproximadamente 16 μm e após o processo de MAF esse valor foi reduzido para 0,89 μm . Quando comparado à retificação ($R_a = 2,75 \mu\text{m}$), discutido anteriormente, a operação de MAF gerou menores valores de R_a . Dessa forma, para as condições testadas, em termos de qualidade superficial da peça, o MAF foi mais eficiente, quando comparado à retificação. Todavia, foi requerido maior tempo de usinagem (60 min) para tal redução. Em relação à dureza, inicialmente (superfície manufaturada), o valor era de 53,5 HBR e após MAF este valor foi reduzido para 49,3 HBR (apenas 2,5% menor que a dureza da superfície após retificação); portanto, não ocorreu um endurecimento da superfície causado pela usinagem. Além disso, segundo os autores, a superfície da peça após a operação do MAF apresentou melhor desempenho tribológico (menor coeficiente de fricção e maior resistência ao desgaste) quanto àquela obtida pela SLS e após a retificação. Tal fato deve-se à melhor qualidade superficial obtida pelo MAF. Adicionalmente, conforme já ressaltado, pode-se verificar por meio das técnicas de espectroscopia Raman e espectroscopia de Fotoelétrons excitados por raios X (XPS), uma vez que não ocorreram reações químicas detectáveis em nível subsuperficial de 10 μm da peça, após o pós-processamento.

[Guo *et al.* \(2017\)](#) e [Guo *et al.* \(2019\)](#) investigaram a viabilidade de um novo método de MAF que envolve movimento rotativo-vibratório para melhorar a qualidade de superfícies internas com duplas camadas, em peças de Inconel 718 manufaturadas por SLM, avaliando o efeito dos tipos de abrasivo, rotação e pressão do ar do pistão pneumático (que modifica a frequência e amplitude da vibração). Para os testes, foi mantido constante o *gap* de 10 mm e uma velocidade de avanço de 200 mm/mm. O valor da rugosidade (R_a) inicial (SLM) era de 7,22 μm e foi reduzido para 0,51, 0,36 e 0,23 μm com a aplicação do movimento de rotação, vibração e combinação de rotação e vibração, respectivamente. Dessa forma, evidencia-se a qualidade superficial obtida pelo método de MAF, bem como o benefício da combinação dos movimentos de rotação e vibração. Em relação ao tipo de abrasivo, o uso da combinação dos abrasivos SS430 e do pó de SiC (40 μm de diâmetro) apresentou-se mais eficiente. No tocante à rotação e à pressão de ar (frequência e amplitude de vibração), os autores concluíram que para diminuir a rugosidade da superfície são preferíveis baixas velocidades de rotação e menor pressão de

ar, enquanto que o contrário resulta em maiores taxas de remoção e, conseqüentemente, pior qualidade é fornecida à superfície. Além disso, por meio de medições de algumas propriedades físico-mecânicas, pode-se comprovar que o processo de MAF endureceu levemente a superfície, pois o valor de nanodureza como fabricado (SLM) era de 4 GPa e após o MAF esse valor foi para 4,3 GPa, resultando também em um aumento do módulo de Young de 151 GPa para 166 GPa, respectivamente. Nessas condições, a tensão residual foi aliviada de -230 MPa para -30 MPa, respectivamente. Por fim, os autores ressaltam que por meio da avaliação da superfície e da subsuperfície, pode-se concluir que a qualidade superficial da peça fabricada por SLM foi melhorada (não houve deformação e/ou danos observáveis), tendo obtido uma superfície livre de danos com a aplicação do MAF como operação de pós-processamento.

Conforme já mencionado, [Teng et al. \(2019\)](#) utilizaram a retificação como um processo intermediário de pós-processamento da liga AlSi10Mg depositada por SLM, avaliando a rugosidade, morfologia da superfície e dureza. Após a retificação, o processo de MAF foi usado para dar acabamento às peças. O processo foi realizado com uma rotação de 1500 rpm, *gap* de 2 mm, com as partículas magnéticas sendo manufaturadas por atomização a gás (com matriz de ferro e partículas de alumina e SiC – em 3 diferentes tamanho de grão). A R_a após a retificação era de 0,6 μm e foi reduzida para próxima de 0,2 μm , após 24 min de operação (no caso da partícula de alumina, esse valor foi alcançado em apenas 9 min). A morfologia superficial demonstrou qualitativamente que as marcas de retificação foram removidas; porém, novas marcas/texturas superficiais foram geradas pelos grãos abrasivos usados no MAF. Devido às baixas forças de corte durante o processo, após o MAF, houve redução da dureza na camada endurecida pela retificação, pela liberação da energia interna do material.

[Hirano, Furuki e Kousaka \(2020\)](#) estudaram a taxa de polimento em peças de Ti-6Al-4V manufaturadas por L-PBF. O efeito da quantidade e tamanho das partículas abrasivas e magnéticas e da composição da pasta de polimento foram os parâmetros analisados. Com a otimização dos componentes da pasta de polimento, os valores de rugosidade foram minimizados de 0,45 μm R_a e 2,8 μm R_z (após fresamento – rugosidade após deposição não foi reportada) para cerca de 0,05 μm R_a e 0,5 μm R_z após 70 ciclos (menos de 10 s de polimento). A pasta abrasiva otimizada apresentou uma taxa de polimento duas vezes maior que a da pasta abrasiva padrão, realizando-se assim um aumento da qualidade superficial em menor tempo de processamento. Além disso, os autores descreveram um método para derivação da constante de polimento (ou fator de remoção, k da Equação de Preston 2.33) e construção do modelo de previsão da profundidade de polimento, podendo prever a remoção de material.

[Zhu et al. \(2022\)](#) investigaram o impacto do MAF em amostras de AlSi10Mg preparadas por SLM com diferentes ângulos de formação ($\alpha = 90, 100, 110, 120, 130$ e 140°). Análises da morfologia da superfície, dureza e rugosidades foram realizadas. Devido ao efeito de escada, $\alpha = 90^\circ$ gerou a menor rugosidade ($4 \pm 0,5 \mu\text{m}$ R_a). Após MAF (rotação de 1700 rpm, avanço de 15 mm/min e *gap* de 2 mm), a rugosidade foi reduzida para 0,08 μm R_a (representando uma

melhora de 98% na qualidade superficial).

[Zhao et al. \(2022\)](#) e [Li et al. \(2022\)](#) investigaram o efeito de diferentes combinações de MAF e etapas de tratamento térmico em amostras da superliga Inconel 718 fabricadas por LPBF. Rugosidade, microestrutura e propriedades mecânicas foram avaliadas após diferentes sequências de pós-processamento por tratamento térmicos (homogeneização (H) para eliminar anisotropia e envelhecimento (E) por precipitação para formação de fases secundária que aumentam a resistência mecânica), sendo elas: H+MAF, H+E+MAF e H+MAF+E. O MAF foi eficiente para aumentar a qualidade superficial. Na sequência de pós-processamento H+E+MAF, [Zhao et al. \(2022\)](#) reduziram as rugosidades depois da deposição de $2 \pm 0,62 \mu R_a$ para $0,46 \pm 0,16 \mu R_a$ e de $11 \pm 2,77 \mu R_z$ para $2,47 \pm 0,4 \mu R_z$ em 440 min de polimento. Nessa mesma sequência de fabricação, [Li et al. \(2022\)](#) reduziram de $2,8 \pm 0,3 \mu R_a$ para $0,13 \pm 0,08 \mu R_a$ e $11,4 \pm 0,8 \mu R_z$ para $1,1 \pm 0,03 \mu R_z$ em 180 min de polimento. Para ambos os artigos, os resultados indicam que o processo de MAF e sua ordem na sequência de fabricação tem influência significativa na modificação da microestrutura e melhoria das propriedades mecânicas das amostras, aumentando a deformação total, tensão de escoamento e tensão última.

Por fim, vale destacar que neste trabalho, após a realização das operações de fresamento/-retificação será realizada a operação de MAF, com o intuito de proporcionar melhor acabamento superficial e melhores tolerâncias à peça. Os parâmetros de usinagem (intensidade do fluxo magnético, forma do polo magnético, distância entre a ferramenta e a peça, tempo de processamento) serão avaliados em testes preliminares, buscando minimizar os danos sub/superficiais à peça. Esta pesquisa tem como objetivo encontrar as condições ideais de usinagem para essa operação.

2.3.3 Análise teórica dos modelos do processo de MAF

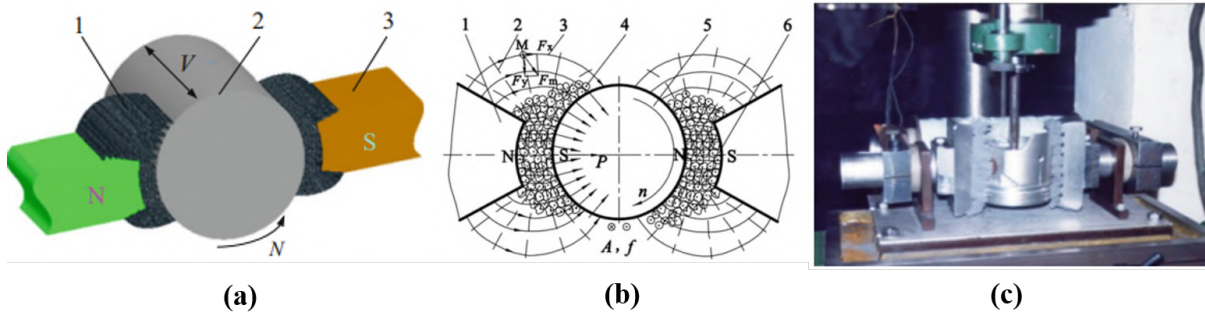
O foco dessa subseção é exclusivamente apresentar modelos do processo de MAF. Para tal, é necessário expressar uma sequência de equacionamentos para o entendimento dos mesmos, evidenciando os diferenciais e as limitações dos modelamentos já existentes. Essa Seção não tem o caráter de revisar conceitos fundamentais, características da técnica, fenômenos e parâmetros envolvidos, entre outros. Para essa finalidade, consultar a revisão da literatura sobre MAF, cujo qual está descrita no Subitem 2.3.1.

Na Figura 22 é apresentado o processo de MAF em uma superfície cilíndrica⁵⁰, exemplificando seus princípios. Na Figura 22 (a), é apresentado o diagrama esquemático deste processo, onde: 1 são as partículas magnéticas abrasivas (do inglês, *magnetic abrasive particles* - MAPs); 2 é peça a ser usinada; e 3 é o gerador de campo magnético. Na Figura 22 (b), é apresentado o esquema das forças, onde há um par de polos magnéticos (N e S), formando um campo magnético entre eles. Dessa forma 1 é um polo magnético; 2 são as linhas equipotenciais magnéticas; 3 são

⁵⁰ O processo MAF também é utilizado em superfícies planas e superfície de forma livre, [Yang e Li \(2018\)](#), mas por questões de apresentação dos princípios, nessa seçãp, foi apresentada apenas a superfície cilíndrica.

as linhas de força magnética; 4 são as MAPs; 5 é a peça; e 6 é a distância entre a peça e polo (*gap*). Na Figura 22 (c), é exibida uma foto do equipamento.

Figura 22 – Processo MAF: (a) representação esquemática dos componentes principais; (b) esquema das forças no processo; e (c) foto do equipamento.



Fonte: adaptado de Yang e Li (2018)

Em relação às forças magnéticas envolvidas, a resultante (\vec{F}_m) das direções X e Y em um determinado ponto M no campo magnético, segundo Yang e Li (2018), é dado teoricamente pela Equação 2.13:

$$\vec{F}_m = \vec{F}_X + \vec{F}_Y \quad (2.13)$$

Sendo \vec{F}_X e \vec{F}_Y dados pelas Equações 2.14 e 2.15, respectivamente:

$$\vec{F}_X = \frac{\pi D^3}{6} \chi H \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2.14)$$

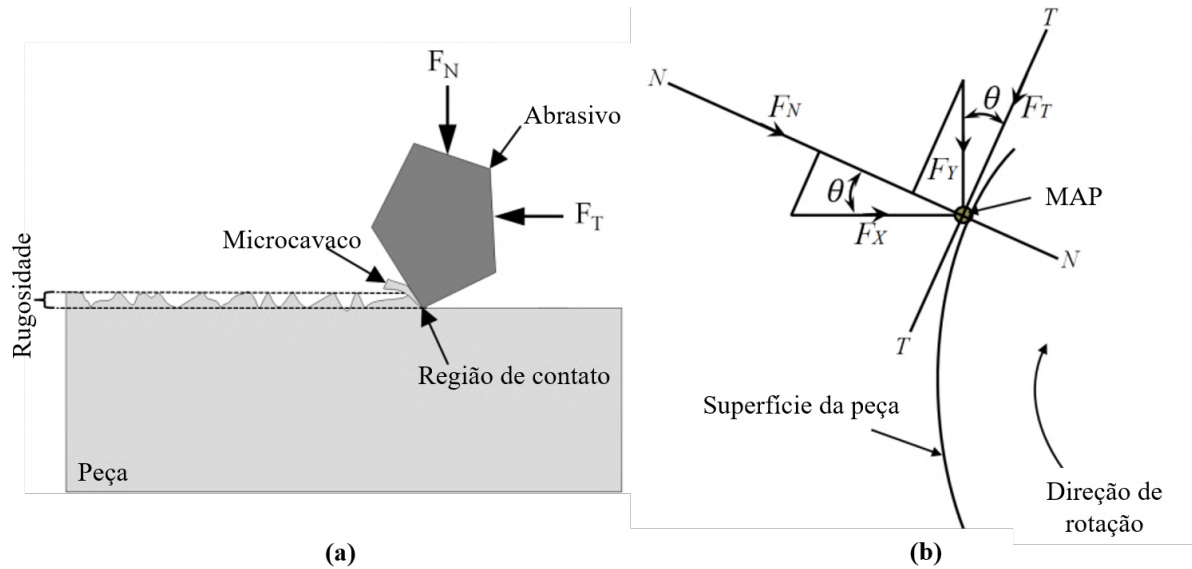
$$\vec{F}_Y = \frac{\pi D^3}{6} \chi H \frac{\partial H}{\partial y} \quad (2.15)$$

Onde: D (ou d_s) é o diâmetro das MAPs, χ é a susceptibilidade magnética das MAPs, H é a intensidade do campo magnético na região, $\partial H/\partial x$ e $\partial H/\partial y$ são as taxas de variações de intensidade do campo magnético ao longo das direções X e Y, respectivamente. As forças também podem ser medidas empiricamente por meio de dinamômetros específicos (com sensibilidade e rigidez adequados à escala) acoplados à máquina, como apresentados nos estudos de Ganguly *et al.* (2013) e Kanish *et al.* (2017).

O modo como as forças tangenciais e normais agem afeta os mecanismos de remoção de material, sendo a força normal responsável por manter as partículas abrasivas e ferromagnéticas unidas (formação dos MAPs na escova abrasiva magnética flexível (do inglês, *flexible magnetic abrasive brush* – FMAB)) e prover microindentações na peça e a força tangencial responsável pela formação do microcavaco (pela ação de cisalhamento) devido à velocidade/rotação entre a peça e os abrasivos (SINGH; JAIN; RAGHURAM, 2006), uma vez que ambas são combinadas para remover os picos da superfície (HENG; KIM; MUN, 2017), conforme apresentado na Figura

23 (a). Na Figura 23 (b) é apresentada um desenho esquemático dessas forças de corte, agindo sobre uma partícula ferromagnética, sendo a força normal⁵¹ (F_N) e tangencial (F_T) decompostas, segundo Judal e Yadava (2013), pelas Equações 2.16 e 2.17, respectivamente:

Figura 23 – Desenho esquemático das forças agindo nas MAPs durante a remoção de material: (a) visão geral e (b) forças decompostas.



Fonte: adaptado de Heng, Kim e Mun (2017) (a) e Judal e Yadava (2013) (b).

$$F_N = F_X \cos \theta + F_Y \sin \theta \quad (2.16)$$

$$F_T = -F_X \sin \theta + F_Y \cos \theta \quad (2.17)$$

Segundo Jain (2009), a partícula abrasiva criará uma profundidade de indentação (h_s , em alguns casos, é dado apenas por h – ver Figura 24 – (a)) na superfície da peça devido à componente normal da força magnética. O autor define que a força necessária (F_{req}) para remoção de material depende da resistência ao cisalhamento (τ_s) do material da peça e da área projetada de penetração (A_p - ver Figura 24 - (b)), sendo ambos relacionados pela Equação 2.18:

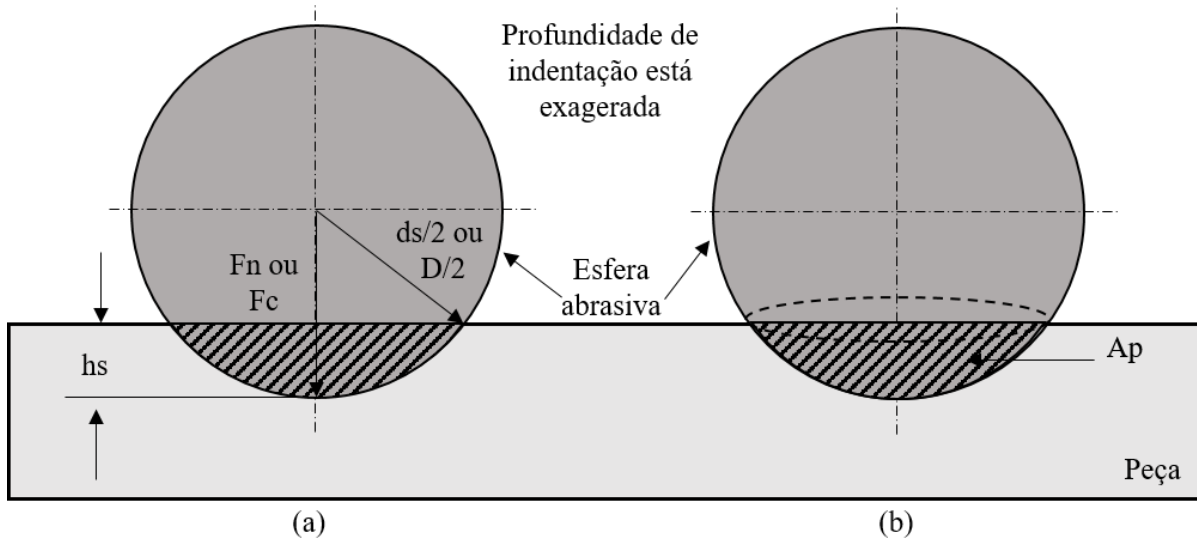
$$F_{req} = \tau_s A_p \quad (2.18)$$

Segundo Jain, Jayswal e Dixit (2007), o A_p pode ser calculado pela Equação 2.19:

$$A_p = \frac{d_s^2}{4} \left[\cos^{-1} \left(1 - \frac{2h_s}{d_s} \right) \right] - \left[\left(\frac{d_s}{2} - h_s \right) \sqrt{h_s (d_s - h_s)} \right] \quad (2.19)$$

⁵¹ A força normal também é denominada de força de corte (F_c).

Figura 24 – Diagrama esquemático da ação do abrasivo na superfície da peça: (a) profundidade de penetração (h_s) e (b) área projetada de penetração (A_p).



Fonte: adaptado de Jayswal, Jain e Dixit (2005).

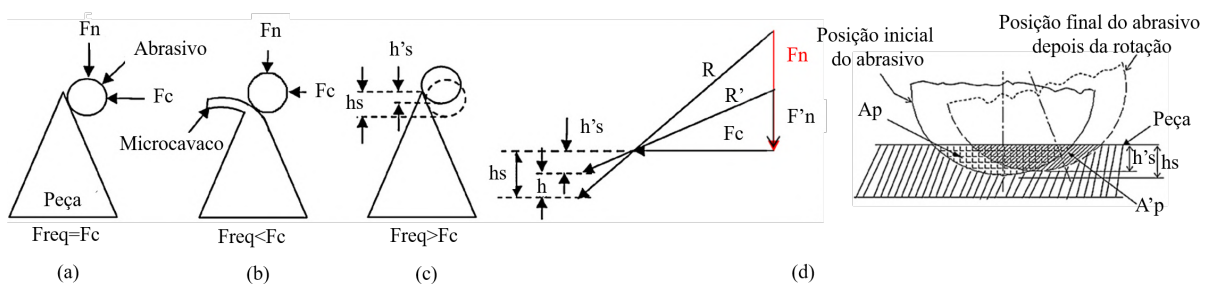
Onde: d_s (ou D) é o diâmetro da partícula abrasiva e h_s é a profundidade de indentação, podendo esse último parâmetro ser definido pela Equação 2.20, de acordo com Jain, Jayswal e Dixit (2007):

$$h_s = \frac{d_s}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_s}{2}\right)^2 - \frac{F_n}{H_m \pi}} \quad (2.20)$$

Onde: F_n é a força magnética normal que age na partícula e H_w é a dureza (Brinell) do material da peça.

Jain (2009) ressalta que existem três possibilidades de condições que podem prevalecer na zona de interação de contato durante o processo de MAF, conforme apresentado na Figura 25 e descritos a seguir:

Figura 25 – Possibilidades de ocorrência durante o processo de MAF: (a) equilíbrio, (b) remoção de material, (c) condição sem corte e (d) ajuste do abrasivo.



R e R' são forças resultantes.

Fonte: adaptado de Jain (2009).

1. Situação de equilíbrio (Figura 25 (a)): ocorre no início do corte e é um estado

crítico de remoção de material, podendo ocorrer grande deformação plástica ou pouca/nenhuma remoção de material, sendo definido pela Equação 2.21:

$$F_{req} = F_c \quad (2.21)$$

2. Remoção de material (Figura 25 (b)): essa é a condição acabamento desejável, no qual o material é removido (definido pela Equação 2.22). Nesse caso, em que a componente normal da força magnética é maior que a força desejável do campo magnético na zona de acabamento, a profundidade de penetração (h_s) do abrasivo também aumenta proporcionalmente.

$$F_{req} < F_c \quad (2.22)$$

3. Condição sem corte (Figura 25 (c)): durante essa condição, não existe remoção de material (definido pela Equação 2.23). Sob esta condição, a força de indentação é menor que a tensão de cisalhamento requerida para remover o material. A partícula abrasiva permanece estagnada nessa condição (sem fazer nenhum corte), a menos que ela se mova para cima ou sua rotação seja ajustada, de modo que a profundidade de penetração da aresta de corte também seja ajustada/reduzida (h'_s - ver Figura 25 (d)), retornando a condição de corte.

$$F_{req} > F_c \quad (2.23)$$

De acordo com a teoria de contato, segundo [Brown, Baker e Maney \(1981\)](#), a profundidade de indentação (h) também pode ser calculada de acordo com a Equação 2.24:

$$h = \left(\frac{3F_n}{8E} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{1}{D^{\frac{1}{3}}} \quad (2.24)$$

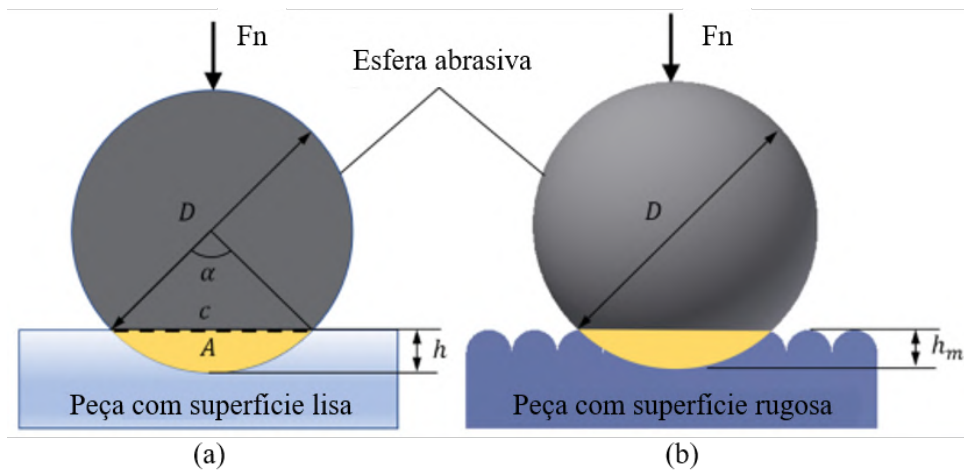
Onde: F_n é a força normal agindo no abrasivo, E é o Módulo de Young do material da peça e D é o diâmetro do abrasivo. [Zhang et al. \(2019\)](#) ressaltam que a Equação 2.24 pode não ser adequada para uma superfície rugosa (como é caso de superfícies produzidas por MA). Assim, os autores modificaram a Equação 2.24, levando em consideração o efeito da rugosidade inicial (R_a) para o cálculo de h , conforme pode ser observado na Figura 26 e calculado pela Equação 2.25:

$$h_n = \left(\frac{3F_n}{8E} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{1}{D^{\frac{1}{3}}} k R_a \quad (2.25)$$

Onde: k é o coeficiente de rugosidade.

Segundo [Gao et al. \(2020\)](#), durante o corte, sempre haverá deformação elástica na região de contato (conforme Figura 27 – a), o que faz com que seja necessário modificar o módulo

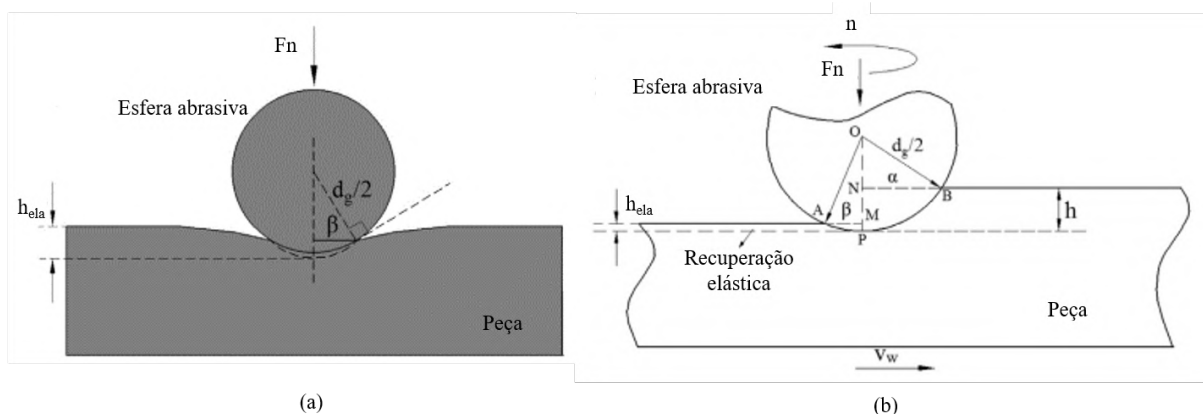
Figura 26 – Profundidade de indentação para (a) superfície lisa e (b) rugosa.



Fonte: adaptado de Zhang *et al.* (2019).

elástico, sendo E_c o módulo elástico da região de contato calculado de acordo com a Equação 2.26:

Figura 27 – Deformação elástica na região de contato: (a) visão esquemática e (b) relações geométricas.



Fonte: adaptado de Gao *et al.* (2020).

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \nu_w^2}{E_w} + \frac{1 - \nu_{par}^2}{E_{par}} \quad (2.26)$$

Onde: E_w e E_{par} são o módulo de elasticidade da peça e da partícula abrasiva, respectivamente; e ν_w e ν_{par} são o coeficiente de Poisson da peça e da partícula abrasiva, respectivamente. Assim, a profundidade de indentação, com a consideração sobre a deformação elástica, é definida como h_{ela} (ver Figura 27 – b).

Gao *et al.* (2020) ressaltam que a recuperação elástica é um critério a ser levado em consideração, cujo qual afeta diretamente a região de contato e, conseqüentemente, aumenta a precisão do modelo de remoção de material. De acordo com as relações geométricas (ver Figura

27 – b), a área de remoção total de uma única partícula pode ser obtida pela Equação 2.27:

$$A_{contato} = A_{arco-BP} + A_{arco-AP} \quad (2.27)$$

Sendo $A_{arco-BP}$ e $A_{arco-AP}$ definidos pelas Equações 2.28 e 2.29, respectivamente:

$$A_{arco-BP} = \frac{d_g^2}{8} \arcsen \frac{2\alpha}{d_g} - \frac{\alpha}{2} \left(\frac{d_g}{2} - h \right) \quad (2.28)$$

$$A_{arco-AP} = \frac{d_g^2}{8} \arcsen \frac{2\beta}{d_g} - \frac{\beta}{2} \left(\frac{d_g}{2} - h_{ela} \right) \quad (2.29)$$

Associado às forças magnéticas, está a pressão de acabamento das MAPs (P_{MAPs}) agindo sobre a superfície da amostra (também representado pela pressão normal – P_n), podendo ser calculada pela Equação 2.30 e/ou, segundo Jiao *et al.* (2015), pela Equação 2.31:

$$P_n = \frac{4F_n}{\pi D^2} \quad (2.30)$$

$$P_n = P_{MAPs} = \frac{H^2 \mu_0}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (2.31)$$

Onde: H é a intensidade do campo magnético, μ_0 e μ_m são a permeabilidade magnética no vácuo e das MAPs, respectivamente. Além disso, assumindo o formato esferoidal das partículas, a pressão pode ser calculada, segundo Kim e Choi (1995), de acordo com a Equação 2.32:

$$P_n = P_{MAPs} = \frac{B_a^2}{4\mu_0} \frac{3\pi(\mu_r - 1)\omega}{3(2 + \mu_r) + \pi(\mu_r - 1)\omega} \quad (2.32)$$

Onde: H_a é a intensidade do campo magnético no entreferro (espaço entre polo magnético e peça), μ_r e μ_0 são a permeabilidade magnética no vácuo e do ferro puro e, ω é a razão de volume de partículas ferromagnéticas no MAP.

O modo como as forças magnéticas e, conseqüentemente, as pressões agem na superfície, altera a remoção de material (M), podendo essa ser calculada de modo simplificado, segundo Preston (1927), de acordo com a Equação 2.33:

$$M = kP_{MAPs}Vt \quad (2.33)$$

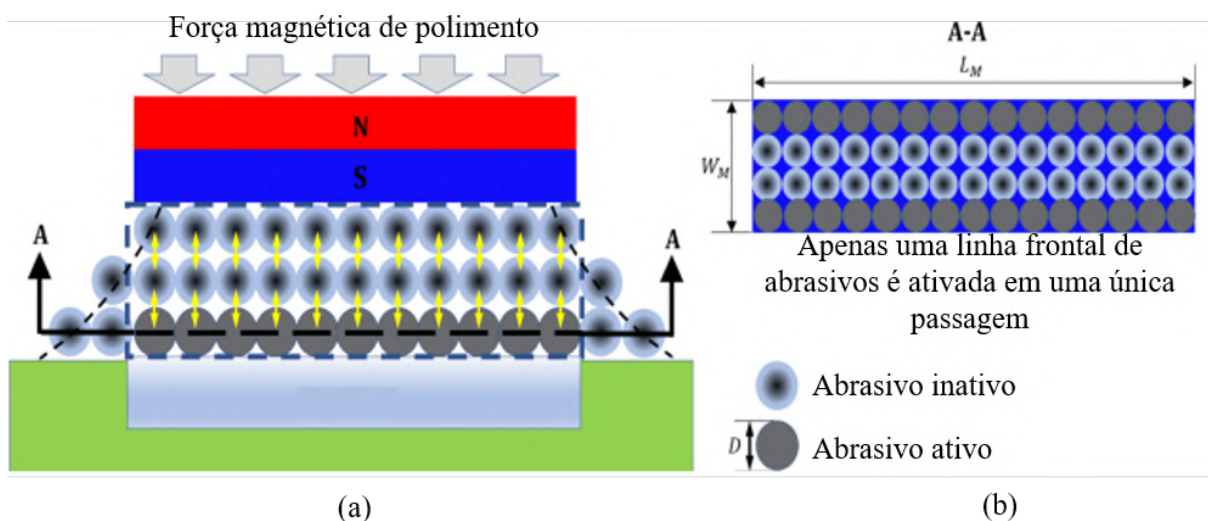
Onde: M é a remoção do material, k é o fator de remoção, P_{MAPs} é a pressão de acabamento, V é a velocidade relativa e t é o tempo de acabamento. Dessa forma, a taxa de remoção de material pode ser aproximadamente estimada usando a equação de Preston. Sendo assim, a taxa de remoção de material é um produto do coeficiente Preston (incluindo tipo de ferramenta,

material da peça, tipo e tamanho do abrasivo, etc.), da pressão e a velocidade relativa entre a ferramenta/abrasivo e a superfície alvo (velocidade de acabamento), dependendo do tempo no qual o processo ocorre. Segundo Kim e Choi (1995), a partir de algumas simplificações, o valor de M também pode ser calculado pela Equação 2.34:

$$M = \Delta mnN \quad (2.34)$$

Onde: Δm é o volume de material removido por uma aresta de corte durante o tempo de acabamento, n é o número de arestas de corte da MAP agindo simultaneamente na superfície e N é o número de MAPs ativas. Em relação a esse último parâmetro, segundo Jayswal, Jain e Dixit (2005), uma vez que a escova abrasiva magnética flexível (do inglês, *flexible magnetic abrasive brush* – FMAB) é composta por vários abrasivos [ver Figura 28 – (a)], considera-se que os abrasivos se distribuem uniformemente nos caminhos circulares, no qual as arestas de corte dos MAPs em contato com a peça removem o material ao longo do caminho circular e reduzem os desníveis e também a altura dos perfis de superfície, melhorando a qualidade superficial da peça. O arranjo dos MAPs é representado apenas na última faixa do FMAB [Figura 28 – (b)], entretanto, na realidade, muitos desses caminhos são produzidas na peça. Segundo Jain, Jayswal e Dixit (2007), o FMAB fornece alimentação intermitente na direção x após a conclusão de cada revolução da escova/haste, até que a área desejada da peça seja coberta. Então, o avanço predeterminado para o FMAB é dado na direção x antes de começar seu movimento na direção y . Portanto, a localização de cada MAP varia em relação à superfície da peça após cada revolução. Assim, de acordo com Zhang *et al.* (2019), o parâmetro N pode ser calculado pela Equação 2.35:

Figura 28 – Número de arestas ativas: (a) visão esquemática e (b) arranjo dos abrasivos.



Fonte: adaptado de Zhang *et al.* (2019).

$$N = \frac{L_m}{D} \quad (2.35)$$

Onde: L_m é o comprimento do imã ou polo magnético.

Os modelos discutidos anteriores consideraram apenas a ação de corte proveniente apenas da partícula abrasiva; porém, não levaram em consideração a presença de partículas magnéticas para formação da MAP. Assim, [Kum *et al.* \(2018\)](#) propuseram um modelo que leva em ponderação os mecanismos de contato e a interação entre as partículas abrasivas e magnéticas que compõem a FMAB. [Misra, M. Pandey e Dixit \(2017\)](#) desenvolveram um modelo que envolve fenômenos estacionários e transitórios independentes que afetam a remoção de material, sendo que o primeiro permanece constante durante o polimento e foi obtido a partir somente dos parâmetros do processo, enquanto o segundo é variável com o tempo e foi obtido em função das irregularidades da superfície. Além da rugosidade, o modelo também incorporou os efeitos da dureza do material e distribuição do tamanho das partículas abrasivas. O modelo proposto por [Shukla *et al.* \(2017\)](#) agregou o efeito das forças de cisalhamento e de *plowing* que agem na partícula abrasiva e afetam os mecanismos de microcorte e padrão de desgaste durante o processo.

Além da remoção de material ser alterada com as forças magnéticas, a qualidade superficial da peça também é afetada por esses parâmetros e, segundo [Kim e Choi \(1995\)](#), a rugosidade média (R_a) pode ser calculada, simplificada, de acordo com a Equação 2.36:

$$R_a = R_a^0 - C' (R_a^0)^{-1/8} (l_w)^{-5/4} \left(\frac{nN\Delta fvt}{H_{mt}\pi\tan\theta l_w} \right)^{1/4} \quad (2.36)$$

Onde: R_a é rugosidade média final, R_a^0 é a rugosidade média inicial, C' é uma constante, l_w é o comprimento usinado, n é o número de arestas de corte da MAP agindo simultaneamente na superfície, N é o número de MAPs ativas, Δf é força de corte agindo em uma aresta de corte, v é a velocidade das MAPs, t é o tempo de acabamento, H_{mt} é a dureza da superfície e θ é o ângulo médio de inclinação de aspereza das arestas de corte. Para o modelamento da rugosidade proposto, considerou-se que a superfície da peça, e sua distribuição de rugosidade, seja aproximada para um perfil triangular.

[Misra, Pandey e Dixit \(2017\)](#) apresentam um modelo matemático para prever a rugosidade, tendo como função os parâmetros de processo (campo magnético, distância entre peça e polo magnético, entre outros), tempo de acabamento, dureza e rugosidade do material. Os autores concluíram que existe uma correlação exponencial entre a rugosidade instantânea e o tempo de processamento. [Kala, Sharma e Pandey \(2017\)](#) introduziram aspectos físicos (abrasivo com distribuição normal de tamanho, forças de fricção e inclinação das correntes da FMAB) no modelo para predição da rugosidade, o que faz com o mesmo se aproxime de uma situação mais realista.

[Gao *et al.* \(2020\)](#) destacam que a suavização dos picos da superfície é dada pela ação combinada da força normal e tangencial e, devido à flexibilidade da escova magnética, a profundidade de indentação   muto baixa e a remo o de material   pequena. Portanto, a melhoria da

superfície é produzida pelo corte sucessivo das MAPs.

Kala, Sharma e Pandey (2017) ressaltam que as indústrias modernas buscam processos de manufatura que possam ser automatizados e, de modo a automatizar o MAF para indústrias futuras, um controle preciso do processo precisa ser desenvolvido, no qual relacione as variáveis de entrada com as variáveis de saída.

Na Tabela 16 é apresentada um resumo dos últimos trabalhos publicados que propuseram um modelamento teórico do processo de MAF. Com base nos modelos, observa-se que forças e pressões de corte possuem relação direta com a qualidade superficial da peça e com a taxa de remoção de material, durante o processo de MAF. Todavia, os modelos matemáticos envolvem algumas simplificações para que seja possível a resolução das equações e, portanto, desprezam algumas condições e parâmetros, de modo a diminuir a sua complexidade. Cada qual apresenta algumas vantagens e limitações, a depender das condições e suposições do modelo. Nesse sentido, ressalta-se que todos os trabalhos envolvem equações analíticas, com validação experimental e consideraram as MAPs como partículas perfeitamente esféricas e a superfície da peça é aproximada para um perfil triangular. Além disso, as propriedades físico-mecânicas das MAPs permaneceram constantes durante o processo, o que não acontece na prática. Dessa forma, existe uma carência da literatura sobre modelos que envolvam alguns mecanismos de remoção de material presentes no processo, tais como efeito do microcorte e extrusão, desgaste por deformação plástica, atrito, corrosão, entre outros. Adicionalmente, nenhum modelo envolve o contato tribológico de três corpos. Tais sugestões podem ser incorporadas em modelos futuros para aumentar a qualidade de predição de rugosidade e remoção de material.

A seguir, a metodologia utilizada neste estudo será apresentada.

Tabela 16 – Comparação dos modelos do processo de MAF.

Referência	Foco do modelo	Diferencial do modelo
Kala, Sharma e Pandey (2017) ^A	Rugosidade	Consideração sobre aspectos físicos (abrasivo com distribuição normal de tamanho, forças de fricção, inclinação da FMAB) que afetam a rugosidade
Misra, Pandey e Dixit (2017a) ^B	Rugosidade	Consideração sobre a rugosidade instantânea
Misra, Pandey e Dixit (2017) ^C	Remoção de material	Consideração de fenômenos estacionários e transitórios independentes que afetam a remoção
Shukla <i>et al.</i> (2017) ^D	Remoção de material	Consideração do efeito das forças de cisalhamento e de <i>plowing</i> que afetam os mecanismos de microcorte e padrão de desgaste durante o processo
Kum <i>et al.</i> (2018) ^E	Remoção de material	Consideração sobre mecanismos de contato e interação entre partículas abrasivas e magnéticas que compõem a FMAB
Zhang <i>et al.</i> (2019) ^F	Remoção de material	Consideração sobre o efeito da rugosidade inicial da peça na profundidade de indentação
Gao <i>et al.</i> (2020) ^G	Remoção de material	Consideração sobre deformação elástica e recuperação do material

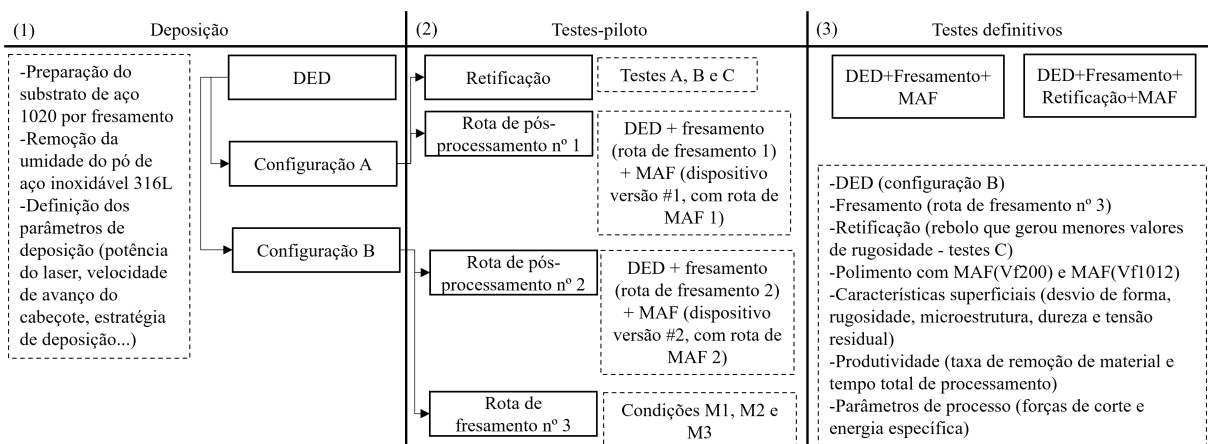
Referências: ^AKala, Sharma e Pandey (2017), ^BMisra, Pandey e Dixit (2017), ^CKala, Sharma e Pandey (2017), ^DShukla *et al.* (2017), ^EKum *et al.* (2018), ^FZhang, Chaudhari e Wang (2019), ^GGao *et al.* (2020).

Fonte: Elaborada pelo autor.

METODOLOGIA

A primeira parte dessa Seção é relacionada aos materiais e métodos utilizados para deposição por DED. Na segunda, são descritos os materiais e métodos utilizados nos experimentos preliminares (denominado de testes-piloto) e definitivos para o pós-processamento de superfícies planas. Na Figura 29 é apresentado um fluxograma geral da metodologia adotada, descrevendo as três principais etapas envolvidas, sendo elas: (1) deposição, (2) testes-piloto e (3) testes definitivos. No primeiro, o pó foi caracterizado e as variáveis, parâmetros e condições envolvidas durante o DED foram descritas. As amostras foram depositadas com duas configurações diferentes. Na segunda etapa, os testes-piloto envolveram diferentes rotas de pós-processamento, sendo elas: retificação, fresamento e polimento magnético abrasivo. Tais testes preliminares foram realizados para explorar as condições das máquinas, ferramentas, condições e parâmetros de processo. Na etapa final, os testes definitivos envolveram duras rotas de pós-processamento. 1) Deposição seguida de fresamento e polimento. 2) Deposição seguida de fresamento, retificação e polimento. O polimento foi realizado duas velocidades de avanço (200 e 1012 mm/min).

Figura 29 – Fluxograma geral da metodologia.

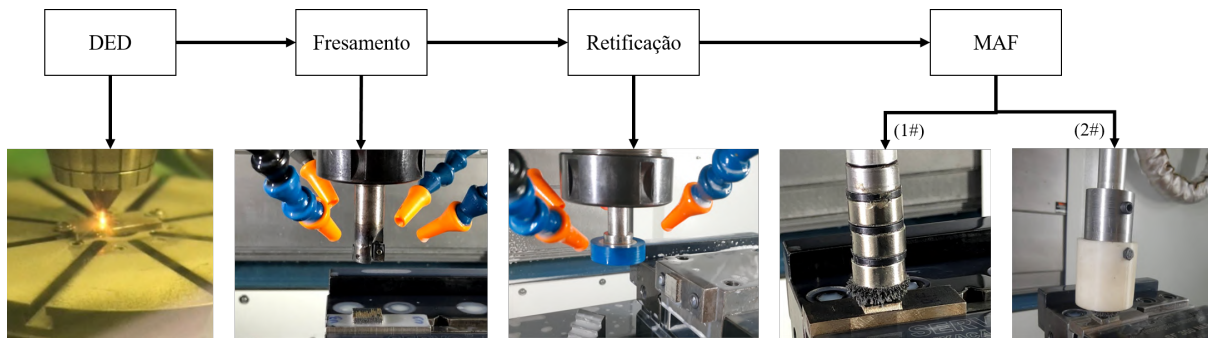


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1 Deposição

Para avaliação da viabilidade dos processos de manufatura em superfícies planas, foram utilizadas quatro etapas para fabricação e pós-processamento (DED, fresamento, retificação e o polimento magnético abrasivo), conforme Figura 30.

Figura 30 – Rota de processamento em superfícies planas.



1# primeira versão e 2# segunda versão.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 17 é apresentada a composição química do pó de 316L atomizado a gás fornecido pela LPW Technology, sendo investigado por espectrometria de emissão óptica por centelha (S-OES) - Anacom Scientific, B2ADV).

Tabela 17 – Composição química do aço inoxidável 316L.

Cr	Ni	Mo	Mn	Si	V	C	Nb	Cu	Ti	P	Al	Fe
18,1	12,4	2,4	1,09	0,6	0,046	0,027	0,026	0,025	0,02	0,007	0,007	Bal

Fonte: Elaborada pelo autor.

A distribuição granulométrica do pó, predominantemente esférica, está entre 40 e 120 μm – análise de peneira¹: $D_v(10) = 57 \mu\text{m}$, $D_v(50) = 82 \mu\text{m}$ e $D_v(90) = 119 \mu\text{m}$ (ver Figura 31 (a)). Para tal verificação, foi utilizado um analisador de tamanho de partículas por difração a laser Mastersizer-3000 (marca Malvern Instruments, modelo Maz3000). Onze medições foram feitas no modo de dispersão por Via Seca – Aero S, utilizando-se o modelo matemático Mie, no qual considera que as partículas são esféricas e não opacas. Desta forma, leva-se em conta a difração e difusão da luz na partícula e no meio. A porosidade do pó (Figura 31 (b)) e das amostras foram investigadas pela técnica de microtomografia computadorizada de raios-X ($\mu\text{-CT}$)² (Zeiss Xradia Versa XRM-510, tamanho de pixel de 0,80 μm , filtro HE#1, 1000 visualizações) com potência de 10 W a 160 kV. Para análise da porosidade do pó, foram utilizados 0,5 g embutidos com resina em um tubo capilar. Já para as amostras após deposição, elas foram preparadas pelo

¹ Esses valores representam que 10, 50 e 90% dos grãos estão abaixo do tamanho em microns apresentado. Por exemplo, $D_v(90) = 119 \mu\text{m}$ significa que 90% dos grãos estão abaixo de 119 μm .

² Análises realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), vinculado ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

processo de eletroerosão a fio³ a partir da região central da amostra com dimensões de 2x2x8 mm³. A porosidade interna da matéria-prima em pó (antes da deposição) e das amostras (após DED) foi de 0,07% e 0,00003%, respectivamente. Antes do DED, o pó foi colocado no forno (1 h, 110°C) para remoção de umidade.

Para a deposição, foi utilizado uma máquina CNC de 5 eixos, fabricada pela empresa BeAM, Módulo 250. Uma foto do processo é apresentada na Figura 31 (c). Duas configurações de parâmetros foram adotadas. Na configuração A, foram depositados corpos de prova, em formato de retangular, com dimensões de 15x20x6 mm³, por meio da estratégia zigue-zague (ver Figura 31 (d)), sem rotação entre as camadas. A potência do laser⁴ foi de 300 W, distância focal (d_f) de 3,5 mm, diâmetro do feixe de laser de 0,75 mm, altura da camada (Δz) 0,2 mm, sobreposição de camadas (Δx) 0,5 mm e velocidade de deposição de 2000 mm/min. Já na configuração B, foi adotada uma estratégia de deposição zigue-zague com rotação de 90° entre as camadas (ver Figura 31 (e)), com dimensões de 12x12x8 mm³. Durante a deposição, dois parâmetros da primeira configuração foram alterados, sendo eles: potência do laser 350 W e sobreposição de camadas (Δx) 0,25 mm. Para ambas as configurações, gás argônio foi utilizado como gás de proteção. A vazão do arraste do pó, bocal e gás de proteção do laser foram de 3, 3 e 6 L/s, respectivamente. Foi utilizado uma taxa de fluxo de pó igual a 6,5 g/min (bico coaxial contínuo, com foco do pó coincidente com o do feixe de laser). 20 amostras foram depositadas no total. As condições de deposição das amostras por DED estão sumarizados na Tabela 18.

Nas Figuras 31 (f), (g) e (h) são apresentadas a topografia da superfície e microestrutura da seção transversal após DED. Pela topografia é possível observar faixas sucessivas e alternadas da direção do laser e a presença de pós aderidos à superfície. Pelo corte CC da seção transversal, os desvios geométricos (típicos do processo de deposição) são evidentes. As imagens microestruturais destacam as poças de fusão e presença de estruturas de solidificação equiaxiais e colunares produzidos devido às taxas de resfriamento. Tais componentes microestruturais são semelhantes aos relatados por Ma, Wang e Zeng (2017), Saboori *et al.* (2020) e Guo *et al.* (2021).

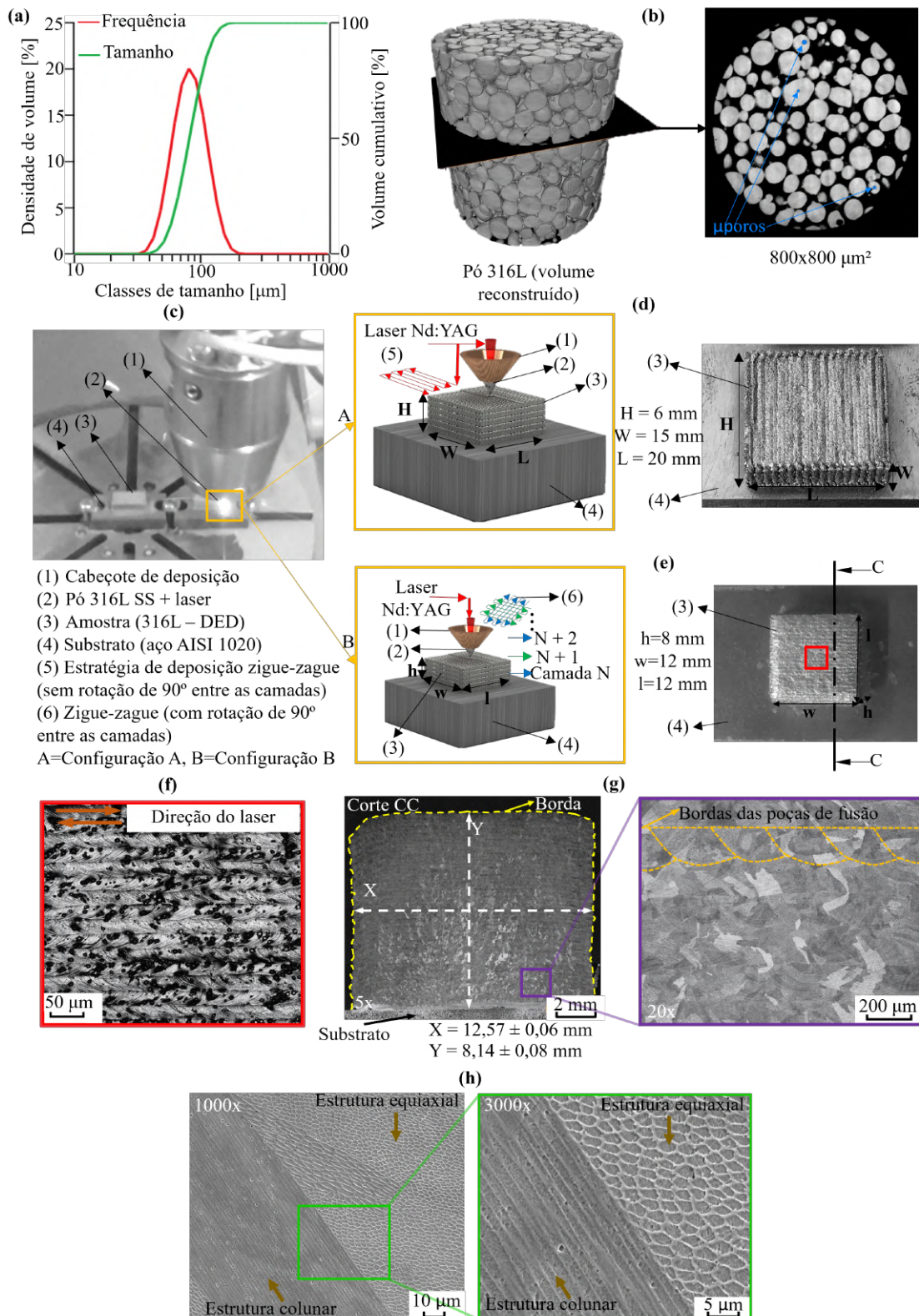
As amostras depositadas com configuração A foram pós-processadas pelos testes-piloto (testes de retificação e rota de processamento n° 1), enquanto as amostras fabricadas pela configuração B foram pós-processadas pelos testes-piloto (rota de processamento n° 2 e rota de fresamento n° 3) e testes definitivos, conforme será discutido a seguir.

Após a deposição, as amostras foram submetidas à usinagem nas máquinas de 3 eixos D800 Hybrid, D600 (ambas fabricadas pelas Indústrias Romie) e C800U (fabricada pela Hermle). Na qual, foram realizados os ensaios de fresamento, retificação e MAF. Inicialmente, por meio de uma pesquisa exploratória foram realizados testes-piloto desses processos com o intuito de

³ Cortes realizados no Instituto de Materiais Tecnológicos do Brasil (MIB), em uma máquina fabricada pela Eurostec. Foi usado um fio de molibdênio, com uma lacuna de corte de 0,2 mm, tensão de 50 V, corrente elétrica de 4 A, utilizando fluido dielétrico (pasta diluída em água) e velocidade de avanço de 0,5 mm/min.

⁴ Laser contínuo de Nd:YAG (acrônimo do inglês *Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet*), com comprimento de onda (λ) de 1070 nm.

Figura 31 – (a) Distribuição do tamanho da partícula, (b) reconstrução volume do pó, (c) foto do processo de DED, (d e e) representação esquemática e amostra depositada com configuração A e B, (f) topografia da superfície, (g) seção transversal da amostra e (h) microestrutura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 18 – Condições utilizadas na deposição por DED.

Máquina	BeAM-Modulo 250 (5 eixos)	
Laser	Contínuo Nd:YAG (1070 nm), 0,75 mm diâmetro	
Pó	Alimentador: ranhura do disco (1,3 mm profundidade e 15 mm largura), 6,5 g/min taxa de fluxo de pó	
Gás protetivo	Argônio (3 L/min gases de arraste e do bocal , 6 L/min gás de proteção do laser)	
Distância focal (d_f)	3,5 mm	
Altura da camada (Δz)	0,2 mm	
Avanço (V_f)	2000 mm/min	
Potência (P)	300 W	350 W
Sobreposição de camada (Δx)	0,5 mm	0,25 mm
Estratégia de deposição	sem rotação entre	com rotação de 90°
zigue-zague	as camadas	entre as camadas
Configuração	A	B

Fonte: Elaborada pelo autor.

adquirir conhecimento do comportamento das máquinas, ferramentas, condições e parâmetros de corte do aço inoxidável 316L fabricado por DED, conforme descritos a seguir.

3.2 Testes-piloto de pós-processamento

Para os ensaios de fresamento, três conjuntos de experimentos foram realizados, sendo denominados de rotas de fresamento 1, 2 e 3. Em testes preliminares, procurou-se explorar o desempenho do processo por meio de duas rotas de pós-processamento. Na primeira, a velocidade de corte foi o parâmetro variável, mantendo-se o avanço constante e com valor o mínimo possível (próximo ao limite da máquina). Na segunda e terceira, a velocidade de avanço foi variada, mantendo-se a velocidade de corte constante. As condições e parâmetros para as rotas 1 e 2 são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Condições e parâmetros utilizados no fresamento nas rotas de pós-processamento 1 e 2 das peças planas.

	Rota de fresamento 1		Rota de fresamento 2	
Constantes	f_z	0,008 mm/rot	V_c	300 m/min
	a_p	0,1 mm	n	4774 rpm
	Fluido	Vasco 6000, 6%	a_p	0,1 mm
Variáveis	V_c	300, 400 e 500 m/min	Fluido	Vasco 6000, 6%
	(n)	(4774, 6366 e 7985 rpm)	f_z	0,027, 0,053 e 0,108 mm/rot
Referenciados por	FVc300, FVc400 e FVc500		(V_f)	(254, 508 e 1016 mm/min)
				Ff254, Ff508 e Ff1016

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para as rotas 1 e 2 supracitadas, foi utilizado um corpo de fresa CoroMill® 390 de topo 90° (R390-020A20-11L), com duas pastilhas de corte. Em relação à ferramenta de corte, foi utilizado um inserto com a especificação R390-11T3 08M-PL 1030, tendo as principais características: revestimento de PVD TiAlN, ângulo da aresta de corte principal igual a 90°, comprimento da aresta alisadora de 1,2 mm, raio de aresta secundária de 20 μm e raio de ponta de 0,8 mm.

Na sequência, de modo a aumentar a produtividade e diminuir o tempo de fresamento, o corpo de fresa foi substituído, mantendo-se os mesmos insertos descritos anteriormente. O novo corpo de fresa possui a mesma classe, porém com três pastilhas de corte (especificação R390-020A20-11M). As condições de fresamento foram determinadas com base nas recomendações do fabricante (Sandik Coromant), que foram: rotação (n), 4215 rpm; velocidade de corte (V_c), 265 m/min; profundidade de corte (a_p), 0,4 mm; e avanço por dente (f_z), 0,08, 0,12 e 0,2 mm/dente (referenciados como M1, M2 e M3, respectivamente). Tais valores de f_z correspondem à velocidade de avanço (V_f) igual a 1012, 1518 e 2531 mm/min, respectivamente. Esse conjunto de testes foi denominado de rota de fresamento 3.

Para os ensaios de retificação, três conjuntos de experimentos foram realizados, sendo denominados de Testes A, B e C. Inicialmente, foram utilizados três tipos de rebolos, sendo eles: rebolo superabrasivo eletrodepositado de cBN, com especificação B1-S-1FF1W-35-5-2,5-47-6,35-B252, rebolo vitrificado de cBN, com especificação K SS 10 NYE B54 V240 e rebolo com ligante resinoide elástico, *Flute* (azul-D15), com especificação 1A1 33-5-10-9 D15 Q-FLUTE-B. Para o primeiro, foi adotada uma estratégia frontal (de topo) de retificação e para os dois últimos, a estratégia utilizada foi tangencial (lateral). O centro de usinagem D800 Hybrid com mandril hidráulico ISO 40 - MAS BT 403 foi utilizado para esses testes, denominados de Teste A, sendo as condições e parâmetros experimentais estão apresentadas na Tabela 20.

Na sequência, para o conjunto de Testes B, utilizando-se a máquina D600 (Romi), cone BT40 porta pinça, mais rebolos com superabrasivos eletrodepositados de cBN e diamante foram testados (tamanho de grão equivalente a 150-180 μm), tendo especificações de B1-S-1A1W-38-20-20-80-B181 e B1-S-1A1W-38-20-20-80-D181, respectivamente. Além desses, também foi testado um rebolo tipo copo eletrodepositado de diamante (especificação D46-V-PRO4073) na máquina C800U (Hermle – mandril porta fresa hidráulico HSK63 A). As condições e parâmetros experimentais estão apresentadas na Tabela 21.

Dando continuidade aos ensaios de retificação, o conjunto de Testes C foram realizados na máquina C800U (Hermle – mandril porta fresa hidráulico HSK63 A). Primeiramente, foram conduzidos experimentos para validar o sistema de dressagem instalados na máquina, sendo realizados por um dressador estático de ponta única (largura de atuação, b_d , igual a 0,8 mm). De modo a encontrar o grau de recobrimento (U_d) ideal para a operação (conforme Hassui e Diniz (2003), U_d é definido pela Equação 3.1), três valores para a velocidade transversal de dressagem (V_{id}) foram testados, sendo eles 1500, 150 e 75 mm/min, correspondendo a um U_d igual a

Tabela 20 – Condições e parâmetros utilizados nos Testes A de retificação para pós-processamento das peças planas.

Rebolo	Teste	n (rpm)	V_c (m/min)	V_f (mm/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)	Estratégia
Eletrodepositado de cBN (B252)	1	4000	251	5,0	0,001	0,020	F
	2	6000	377	7,5	0,001	0,020	F
	3	6000	377	7,5	0,001	0,010	F
	4	8000	503	10,0	0,001	0,005	F
	5	6000	377	15,0	0,003	0,005	F
	6	6000	377	30,0	0,005	0,005	F
Vitrificado de cBN (B54)	1	4000	402	30,0	0,008	0,020	T
	2	8000	804	30,0	0,004	0,020	T
	3	8000	804	30,0	0,004	0,010	T
	4	8000	804	30,0	0,004	0,010	TP
	5	8000	804	60,0	0,008	0,010	T
	6	8000	804	60,0	0,008	0,005	T
<i>Flute</i> (azul-D15)	1	8000	829	60,0	0,008	0,010	TP
	2	8000	829	60,0	0,008	0,030	TP
	3	8000	829	60,0	0,008	0,005	TP
	4	12000	1244	60,0	0,005	0,010	TP
	5	15000	1555	60,0	0,004	0,010	TP
	6	15000	1555	120,0	0,008	0,010	TP

F=Frontal, T=Tangencial e TP=Tangencial de Passes.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4, 42 e 85, respectivamente. Para os testes de dressagem ($a_d=20 \mu\text{m}$), foi testado um rebolo convencional de Al_2O_3 , com especificação NQ80-L-10VS3, sendo as condições de retificação mantidas constantes ($n=8000 \text{ rpm}$, $V_c \approx 21 \text{ m/s}$, $a_p=20 \mu\text{m}$, $v_f=150 \text{ mm/min}$). Após a definição dos parâmetros de dressagem, três rebolos (especificações: 1A1 33-5-10-9 D15 Q-FLUTE-B, NQ80-L-10VS3 e ACR FE 38A80 k) foram dressados utilizando a mesma velocidade transversal de dressagem V_{td} (considerada ideal para os testes – resultando em menor rugosidade na peça após retificação sem apresentar queimas) e os parâmetros de retificação foram testados, conforme apresentados na Tabela 22.

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (3.1)$$

Onde: b_d é a largura de atuação do dressador e S_d é o passo de dressagem, sendo calculado, segundo Malkin e Guo (2008), pela Equação 3.2:

$$S_d = \frac{v_{td}}{N_s} \quad (3.2)$$

Onde: v_{td} é a velocidade transversal de passagem do rebolo ao longo do dressador e N_s é a rotação do rebolo.

Tabela 21 – Condições e parâmetros utilizados nos Testes B de retificação para pós-processamento das peças planas.

Rebolo	Teste	n (rpm)	V_c (m/min)	V_f (mm/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)	Estratégia
Eletrodepositado de cBN (B181)	1	8000	16	144	0,018	0,01	T
	2			30	0,004		
Eletrodepositado de diamante (D181)	1	8000	16	144	0,018	0,01	T
	2			30	0,004		
	3			150	0,019		F
	4			300	0,038		
	5			450	0,056		
Eletrodepositado de diamante (D46-copo)	3	11458	45	500	0,044	0,01	F
	4			750	0,065		
	5			1000	0,087		

T=Tangencial, F=Frontal.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22 – Condições e parâmetros utilizados nos Testes C de retificação para pós-processamento das peças planas.

Rebolo	Teste	RPM (mm-1)	V_c (m/min)	V_f (mm/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)	Estratégia
<i>Flute</i> (azul-D15)	1	8000	14	150	0,019	0,01	TP
	2			300	0,038		
	3			450	0,056		
Convencional de alumina (NQ80)	1	8000	21	75	0,009	0,01	TP
	2			150	0,019		
	3			225	0,028		
	4			300	0,038		
	5			450	0,056		
	6			14500	38		
Convencional de alumina (A80-copo)	1	3000	16	200	0,067	0,01	FP
	2			400	0,133		
	3			600	0,200		

TP=Tangencial de passes, FP=Frontal de passes.

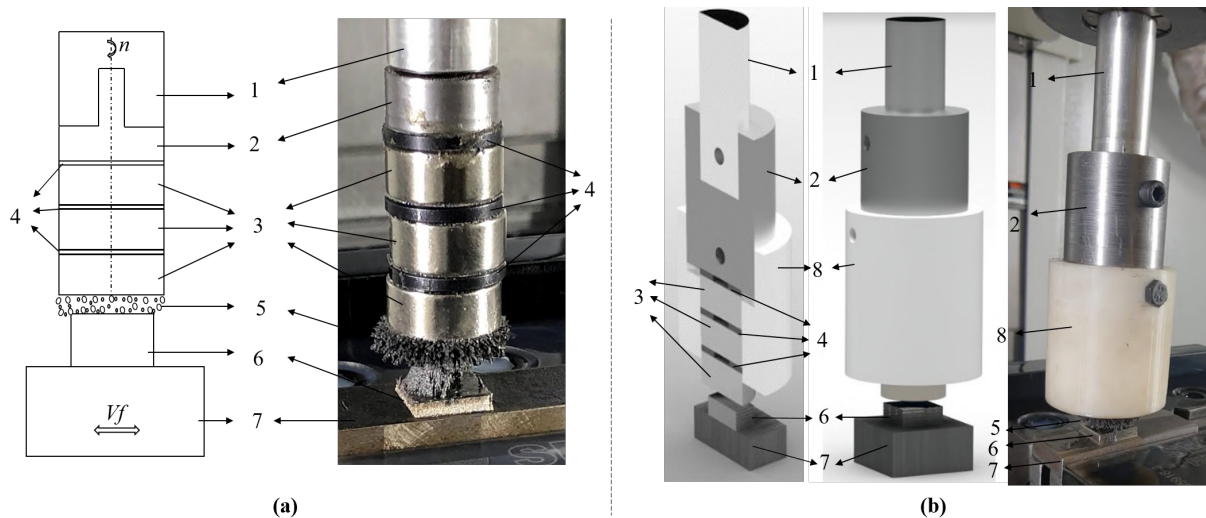
Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, vale ressaltar que, ao total, oito rebolos foram utilizados como possíveis alternativas para retificação em centros de usinagem convencionais (3 eixos), no qual diversas condições foram avaliadas para o pós-processamento das amostras de aço 316L fabricados por DED. Todos os conjuntos de testes (A, B e C) foram realizados com fluido de corte em abundância. Utilizou-se o fluido de corte Vasco 6.000 (emulsão base vegetal semissintética, miscível em água), com concentração de 6%. Esse valor foi monitorado por meio de Refratômetro de Mão, marca Quimis[®], modelo Q-767-1. De modo a evitar contaminações no fluido de corte, o reservatório da máquina foi esvaziado e limpo. Além disso, após a limpeza inicial e antes da colocação do Vasco 6.000, o tanque foi preenchido com água e detergente Blasorun 5 (concentração de 2%), cujo qual a

máquina ficou com a bomba hidráulica ativada durante uma semana (em média, 6 horas por dia) para circular e limpar componentes internos do sistema de refrigeração.

Em relação aos processos de MAF, foram utilizadas duas versões de dispositivos (Figura 32). A primeira (1#) foi feita com os ímãs de neodímio livres, seguindo o mesmo procedimento adotado por Yamaguchi, Fergani e Wu (2017). Todavia, durante os experimentos, notou-se que os ímãs ficavam oscilando no eixo Z da máquina, com a possibilidade de se soltarem e causarem possíveis danos ao conjunto máquina/peça. Dessa forma, foi desenvolvido uma segunda versão (2#), na qual foi elaborado um dispositivo que permita acoplar os ímãs em seu interior, mantendo-os sem oscilação no eixo Z da máquina. Além disso, o dispositivo permite altas rotações, com segurança.

Figura 32 – Pós-processamento por MAF em superfícies planas: (a) primeira e (b) segunda versão.



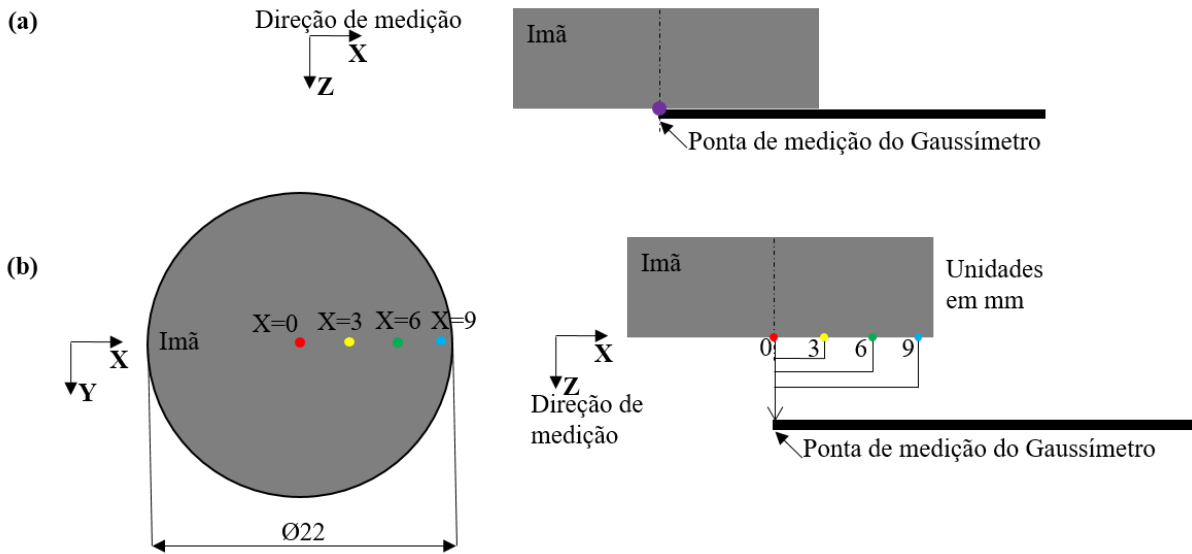
1-Corpo de alumínio, 2-Suporte magnético, 3-Ímãs, 4-Arruelas, 5-Escova flexível, 6-Amostra depositada, 7-Substrato, 8-Casca acopladora de ímãs.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com essa disposição dos ímãs apresentados na Figura 32, foi realizado a medição de densidade de fluxo magnético por meio de um gaussímetro, da marca MagTek, modelo TLMP-HALL-15k. O fluxo magnético foi medido em diversas posições. Na primeira configuração, a ponta de medição (*probe*) foi encostado nos ímãs ($Z = 0$ mm), com variação do eixo X para medição do campo (conforme Figura 33 – (a)). Na segunda configuração, o *probe* foi variado nas direções Z e X. No eixo Z, o *probe* foi deslocado de zero (encostado no ímã) até 3 mm abaixo. No eixo X, foi analisado em $X=0$ (centro do ímã) até 9 mm em direção à borda do ímã (deslocado de 3 em 3 mm) (conforme Figura 33 – (b)).

O processo de MAF foi realizado em duas rotas de pós-processamento. Na primeira, foi utilizado a versão (1#) do dispositivo, sendo aplicado após a rota de fresamento 1. Na segunda, foi utilizado a versão (2#) do dispositivo, aplicado após a rota de fresamento 2. As condições e parâmetros para cada rota são apresentadas na Tabela 23.

Figura 33 – Configuração esquemática para medição do campo magnético para polimento de superfícies planas: (a) alteração do eixo X e (b) alteração do eixo Z.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 23 – Condições e parâmetros utilizados no MAF para pós-processamento das peças planas.

	Rota de MAF 1	Rota de MAF 2
Etapa anterior	Rota de fresamento 1	Rota de fresamento 2
Ímãs	3 Nd-Fe-B (N52): \varnothing 22×10 mm	
Movimento	Movimento linear: comprimento de 20 mm (1 ciclo), avanço: 1 mm/s	
Gap	2 mm	
Lubrificante	Óleo hidráulico, Hydra XP 32 - 3 g	
Partículas magnéticas	Partículas de ferro (60 μ m dia.), 4 g	
Abrasivo	Al ₂ O ₃ (0,05 μ m dia.), 0,5 g	Al ₂ O ₃ (1 μ m dia.), 0,5 g
Rotação	500 rpm	500 e 2000 rpm
Tempo	300, 600 and 900 s (5, 10 e 15 min)	100, 200 and 300 s
Referenciados por	MAF5, MAF10 e MAF15	MAF100, MAF200 e MAF300

Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando a versão (1#), a escova flexível magnética (FMAB) foi feita pela mistura de partículas de ferro (\varnothing 60 μ m, 4g), pasta de alumina (\varnothing 0,05 μ m, 1 g) e fluido de corte (óleo hidráulico - Hydra XP32, 5 ml). Três ímãs de neodímio, Nd-Fe-B (N52), foram utilizados, com geometria de \varnothing 22 × 10 mm. Foi utilizado um movimento linear na amostra ($V_f = 60$ mm/min) e uma rotação dos ímãs de 500 rpm. A distância entre a superfície da amostra e os ímãs foi mantida em 2 mm (campo magnético de 544 mT - medido no centro dos ímãs por um gaussímetro da MagTek, modelo TLMP-HALL-15k). Cada amostra foi processada em diferentes tempos de acabamento, sendo 5, 10 e 15 min. A partir desse ponto, os corpos de prova processados por estas condições serão denominados de MAF5, MAF10 e MAF15, respectivamente. Essa versão foi aplicada após a rota de fresamento 1.

De modo a validar o dispositivo da versão (2#), duas rotações foram analisadas (500 e 2000 rpm). Para o FMAB, foi utilizada outra pasta de alumina, com tamanho da partícula de $1 \mu\text{m}$ de diâmetro. Foi utilizada a mesma configuração de imãs, movimento linear e distância entre a superfície da amostra e o imã descritos anteriormente. Cada amostra foi processada em diferentes tempos de acabamento, sendo 100, 200 e 300 s. A partir desse ponto, os corpos de prova processados por estas condições serão denominados de MAF100, MAF200 e MAF300, respectivamente. Essa versão foi aplicada após a rota de fresamento 2.

Para caracterização do comportamento da escova flexível (ferramenta de corte) empregada no processo de polimento, vídeos foram adquiridos com a Câmera de Alta Velocidade Phantom monocromática modelo V1612. A ferramenta (sem a presença de óleo na composição da escova flexível) foi rotacionada em 500, 2000, 4000 e 6000 rpm. Vídeos do processo foram realizados com taxa de aquisição de 9000 imagens/s e resolução de 1280×720 pixels. O software Phantom Video Player foi utilizado para tratamento dos vídeos e imagens.

Para avaliação qualitativa e quantitativa da qualidade superficial das peças, as topografias das superfícies e rugosidades foram analisadas. A topografia da superfície das peças depositadas, fresadas e polidas por MAF foi avaliada pelo microscópio confocal laser 3D, marca Olympus, modelo Lext OLS4000. As rugosidades (R_a , R_z , S_a e S_z) também foram avaliados por esse microscópio, onde foram medidas em cinco pontos distintos da peça. Para a superfície após a deposição, foi utilizada uma lente objetiva de 10x, com área de avaliação de $5107 \times 5116 \mu\text{m}^2$. Para as amostras fresadas e polidas por MAF, foi utilizada uma lente objetiva de 50x, com área de avaliação de $258 \times 259 \mu\text{m}^2$. Para a checagem dos resultados, as rugosidades também foram medidas em pontos distintos das peças, por meio de um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Talysurf 50, com filtro Gaussiano e *cut-off* de acordo com a ISO 4287 ([INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1997](#)).

Após adquirir conhecimento sobre o comportamento e interação das ferramentas com os corpos de prova, os testes definitivos de pós-processamento foram realizados, envolvendo as condições e parâmetros de usinagem que foram considerados ideais para o aço inoxidável 316L depositado por DED.

3.3 Testes definitivos de pós-processamento

A máquina CNC definida para os testes definitivos dos experimentos de fresamento, retificação e MAF foi o centro de usinagem vertical Hermle C800U (3 eixos, potência de 18 kW, rotação máxima de 24000 rpm (com tolerância de ± 3 rpm) e resolução de posicionamento de 500 nm). Antes de cada ensaio, um ciclo com duração de 30 min para aquecimento dos eixos da máquina era acionado.

Na Tabela 24 é apresentada as condições operacionais e na Figura 34 é detalhada a configuração esquemática de cada pós-processamento. As condições de fresamento e retificação

foram determinadas com base nos testes-piloto e recomendações dos fabricantes, no qual foram realizados três passes de usinagem para cada processo. Para o fresamento, foram escolhidas as condições M1 e M3 da rota de pós-processamento 3 descrita nos testes-piloto. Para a retificação, o rebolo de copo reto ($101,60 \times 50,80 \times 31,75$ mm³, ACR FE 38A80 k) foi usado em uma configuração vertical (retificação de topo), sendo essa ferramenta determinada nos Testes C, descrito nos testes-piloto. Esse rebolo foi dressado adotando-se os seguintes parâmetros: grau de recobrimento (U_d) de 32, profundidade de dressagem (a_d) de 10 μ m, rotação (n) de 6000 rpm, velocidade de avanço transversal (v_{td}) de 150 mm/min, passo de dressagem (S_d) de 0,025 mm/rot e número de passes (Z_d) igual a 3. Esses parâmetros foram definidos através de testes preliminares, a fim de minimizar a rugosidade da peça. O dressador de ponta única foi prendido por parafusos em um dispositivo que foi fixado na morsa instalada na máquina (Marca Servo[®]-Fix, modelo SF 300 NLP). Durante os testes de fresamento e retificação foi utilizado o fluido semissintético à base de éster Vasco 6.000, com vazão de 42 L/min e concentração de 6%. Ambas as ferramentas utilizadas no fresamento e na retificação foram acopladas na máquina por um mandril porta fresa hidráulico HSK63-A. Já para o MAF, foi utilizado o dispositivo versão 2#, conforme descrito nos testes-piloto, sendo este desenvolvido para incorporar o MAF no centro de usinagem. Três ímãs permanentes (\varnothing 22x10 mm) foram acoplados dentro de um invólucro de ácido polilático (PLA – fabricada por MA pela técnica de extrusão), cuja função é impedir que os ímãs oscilassem durante o polimento em altas velocidades de rotação. Um polo magnético de aço AISI 1020 (\varnothing 12x5 mm) foi adicionado ao dispositivo para focar o campo magnético em direção à área de superfície a ser polida. Este dispositivo foi acoplado no centro de usinagem por um cone HSK63-A porta pinça. Uma mistura de partículas magnéticas e abrasivos foi colocada ao polo para formar uma escova flexível de partículas ao longo das linhas do campo magnético. Para a operação de MAF, as seguintes condições foram usadas: abrasivo de alumina (1 μ m tamanho do diâmetro médio; 0,1 g), partículas de ferro (60 μ m tamanho do diâmetro médio; 0,9 g) e óleo hidráulico (Hydra XP 32; 0,4 mL). A densidade de fluxo magnético medida a 2 mm abaixo do centro da extremidade do polo foi de 428 mT. Os avanços utilizados no MAF foram as mesmas adotadas na condição de retificação G1 (200 mm/min) e na condição de fresamento M1 (1012 mm/min), respectivamente. Para o MAF no avanço de 200 mm/min, foram realizados 36 passes, com paradas a cada 6 passes para medição da rugosidade e perda de massa. Já para o MAF no avanço de 1012 mm/min, essas medições foram realizadas a cada 10 passes.

Todas as amostras foram fixadas em um acessório de fixação que estava acoplado ao dinamômetro⁵ piezoelétrico (Kistler, tipo 9257BA). Uma frequência de amostragem de 2 kHz foi utilizada durante os processos de fresamento, retificação e MAF, medindo-se as componentes ortogonais da força de usinagem, sendo elas força radial (F_r), força de avanço (F_f) e força axial (F_a), correspondendo aos eixos X, Y e Z da máquina, respectivamente. Foi utilizada uma faixa de medição de $\pm 0,5$ kN na direção dos eixos X e Y e ± 1 kN na direção do eixo Z. Cada medida foi adquirida em três passes de usinagem e o teste foi repetido três vezes. As forças resultantes totais

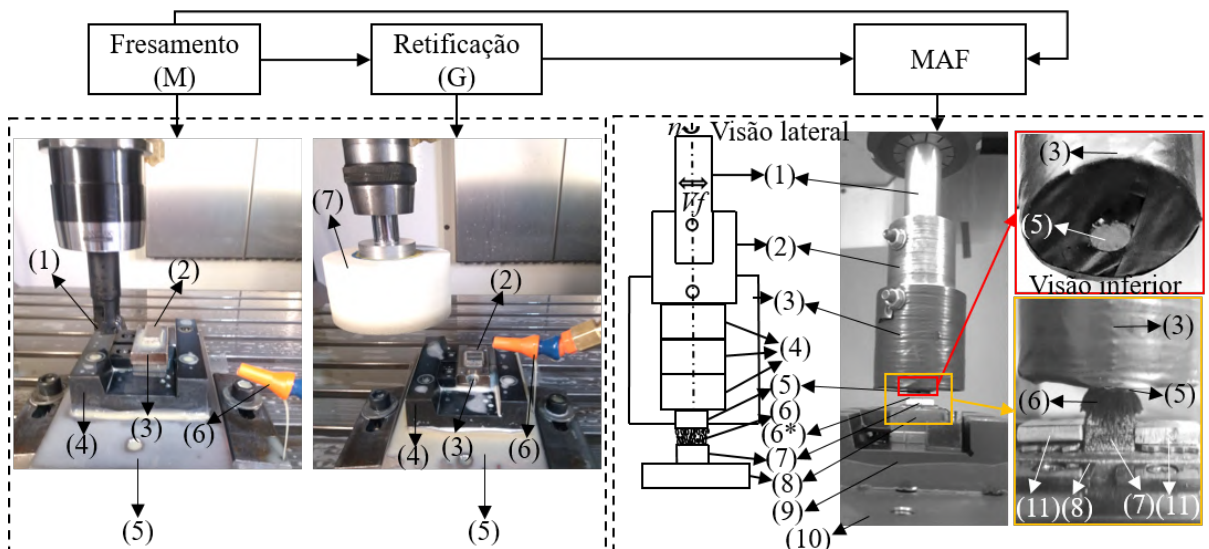
⁵ Sendo esse fixado à mesa da máquina por grampos.

Tabela 24 – Condições dos testes definitivos de pós-processamento.

	Fresamento		Retificação		MAF	
n (rpm)	4218		3000		2000	
V_c (m/min)	265		958		75	
a_p (mm)	0,4		0,01		-	
Distância entre polo/peça (mm)	-		-		2	
f_z (mm/dente)	0,08	0,20	-		-	
f (mm/rot)	-		0,067	0,1	0,506	
Passes (#)	3		3		36	
Tempo total (s)	2,1	0,8	10,8	259,2	129,6	
V_f (mm/min)	1012	2531	200	200	1012	
Referenciado como	M1	M3	G1	MAF(Vf200)	MAF(Vf1012)	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 – Esquema dos testes definitivos de pós-processamento.



Fresamento e retificação: (1) Inserto (R390 –11 T3 08M – PL 1130), (2) amostra (316L – DED), (3) substrato (aço AISI 1020), (4) acessório de fixação, (5) dinamômetro, (6) bico de fluido, (7) rebolo (ACR FE 38A80 k).

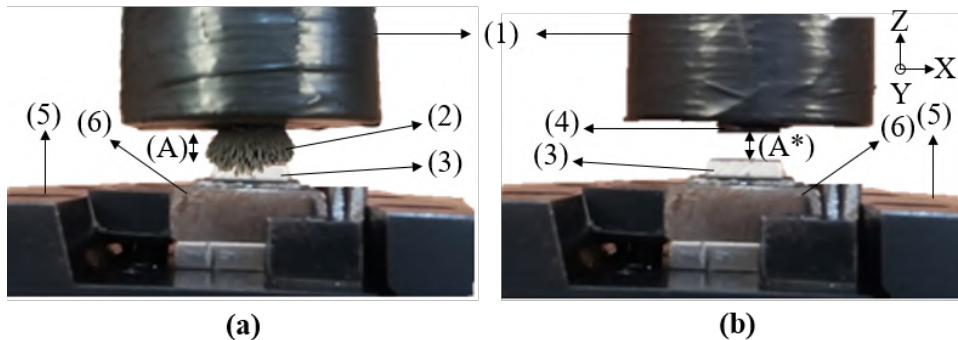
MAF: (1) elemento conector (alumínio), (2) suporte magnético (aço AISI 1020), (3) invólucro (PLA – extrudado), (4) ímãs (Nd-Fe-B (N52) – \varnothing 22x10 mm), (5) polo (aço AISI 1020 - \varnothing 12x5 mm), (6) distância entre polo/peça (com a escola flexível), (6*) distância entre polo/peça (sem a escola flexível), (7) amostra (316L – DED), (8) substrato (aço AISI 1020), (9) fixação, (10) dinamômetro, (11) blocos falsos (alumínio).

Fonte: Elaborada pelo autor.

de polimento do MAF foram calculadas pela diferença entre as forças atuantes na peça medidas com e sem a escova flexível, conforme Figura 35. Com a escova flexível, os dados de forças envolvidas no polimento são aquisitados. As forças magnéticas atuantes na peça sem a presença da escova flexível são descontadas para o cálculo da força resultante total. O sinal de tensão do dinamômetro foi transferido para o conversor analógico/digital (A/D) da National Instruments tipo USB-6341 (16 bits, 500 kS/s). Foi utilizada uma aplicação LabVIEW para aquisição dos

dados.

Figura 35 – Esquemático para medição das forças do polimento: (a) com escova flexível e (b) sem.



(1) Invólucro para os ímãs (PLA – extrudado), (2) Escova flexível, (3) amostra (316L – DED), (4) polo (aço AISI 1020 - \varnothing 12x5 mm), (5) acessório de fixação, (6) substrato (aço AISI 1020), (A) distância entre polo/peça (com a escova flexível), (A*) distância entre polo/peça (sem a escova flexível).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os ensaios de fresamento e retificação, a remoção de material pela balança de precisão foi validada por meio de um relógio comparador (resolução de 1 μ m) acoplado à máquina, conforme representação na Figura 36. Antes das operações de usinagem, a ponta do instrumento de medição foi encostada na superfície da amostra e o valor correspondente da coordenada do eixo Z da máquina foi arquivado. Na sequência, o mandril foi substituído pelo mandril utilizado na operação de usinagem (contendo a fresa ou o rebolo) e o processo é efetuado. Após a remoção de material, o mandril contendo o relógio comparador é novamente colocado. Dando prosseguimento, a ponta do mesmo é apoiada na superfície do corpo de prova e a coordenada do eixo Z é escrita. A diferença entre as coordenadas inicial e final (após a usinagem) representa a espessura de material removida durante o processo. Conhecendo-se os valores da geometria da amostra (obtidos por um paquímetro – 0,01 mm de resolução) é possível determinar o volume de material removido. Tal volume é comparado com aqueles obtidos pela balança de precisão (resolução de 0,1 mg). Conforme apresentado na Tabela 25, a diferença média entre os métodos é de 13%. Tal diferença pode estar associada à precisão da máquina e dos instrumentos de medição utilizados (relógio, paquímetro e balança). Essa estratégia não foi utilizada para o processo de MAF, pois a espessura de material removida após cada determinado número de passes é menor que a precisão do instrumento de medição. Vale ressaltar para que não haja erros de medição, uma vez fixada, a amostra não é removida entre as etapas.

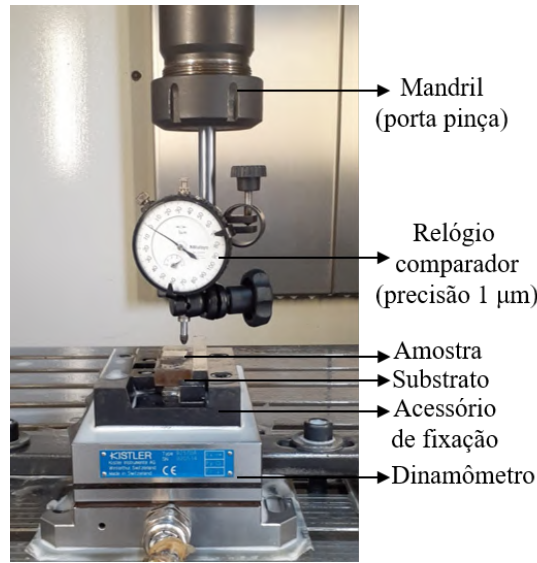
Tabela 25 – Comparação entre os volumes removidos obtidos pela balança e o relógio comparador.

Teste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Diferença* [%]	19,3	24,3	10,6	13,2	14,6	9,1	6,4	7,7	9,5	15,8	13,0

*Valor da diferença absoluta (módulo).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Esquema do relógio comparador acoplado à máquina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados de força medidos foram usados para calcular a energia específica (u) para cada processo de usinagem, de acordo com a Equação 3.3:

$$u_{M,G,MAF} = \frac{F_c \cdot V_c}{TRM} \quad (3.3)$$

Onde: F_c é a força de corte, V_c é a velocidade de corte e a Taxa de Remoção de Material (TRM) é o volume de material removido (V_{rem}) dividido pelo tempo ativo de processamento (t_c). O V_{rem} foi calculado empiricamente pela diferença de massa (antes e depois do pós-processamento) dividida pela densidade teórica do material - sendo esse valor igual a 8 g/cm^3 (MATWEB, 2022). A remoção de material foi medida usando uma balança de precisão (resolução de 0,1 mg).

A energia específica para o DED (ou densidade de energia volumétrica) é calculada, segundo Simchi (2006), de acordo com a Equação 3.4:

$$u_{DED} = \frac{P}{V_f \cdot d \cdot h} \quad (3.4)$$

Onde: P é a potência do laser, V_f é a velocidade de avanço (velocidade de deslocamento do cabeçote de deposição), d é o diâmetro do laser e h é a espessura da camada depositada. O valor de u_{DED} representa a energia total absorvida pela poça de fusão durante a deposição (SIMCHI, 2006).

A relação entre energia específica e espessura teórica de cavaco equivalente (h_{eq}) para cada pós-processo foi criada. Embora a espessura do cavaco no fresamento varie de acordo com o ângulo de rotação da ferramenta, o h_{eq} para o fresamento é baseado nas condições fundamentais

de Woxén, que podem ser calculadas, de forma simplificada, segundo [Ståhl e Schultheiss \(2012\)](#), conforme a Equação 3.5:

$$h_{eq-M} = \frac{A}{L_c} \quad (3.5)$$

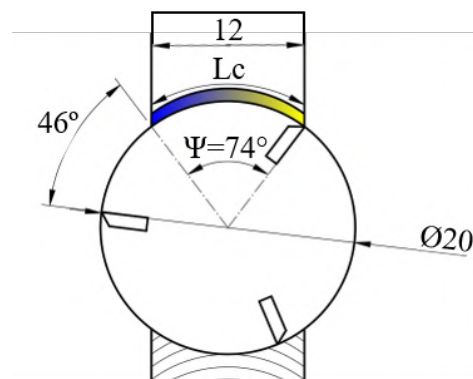
Onde: A é a área do cavaco e L_c é o comprimento da aresta de corte ativa, definidos pelas Equações 3.6 e 3.7, respectivamente.

$$A = f_z \cdot a_e \quad (3.6)$$

$$L_c = R \cdot \psi \quad (3.7)$$

Onde: f_z é o avanço por dente, a_e é a penetração de trabalho, R é o raio da ferramenta e ψ é o ângulo de abertura da aresta de corte ativa durante a usinagem. Tais parâmetros podem ser visualizados na Figura 37.

Figura 37 – Desenho representativo de alguns parâmetros para cálculo do h_{eq} no processo de fresamento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No tocante aos processos abrasivos (retificação e MAF), os valores de h_{eq} foram calculados de acordo com a Equação 3.8:

$$h_{eq-G,MAF} = \frac{TRM}{b \cdot V_c} \quad (3.8)$$

Onde: TRM é a taxa de remoção de material (obtida empiricamente pela razão entre os valores de massa obtida pela balança e a densidade teórica), b é a largura de corte e V_c é a velocidade de corte.

Para avaliação da qualidade superficial das peças, as topografias das superfícies, desvio de forma e rugosidades foram analisadas. As topografias das superfícies das peças depositadas, fresadas, retificadas e polidas por MAF foram avaliadas pelo microscópio confocal laser 3D,

marca Olympus, modelo Lext OLS4000. O perfil medido foi decomposto em dois perfis: primário (1) e rugosidade (2). Em relação ao item (1), o desvio de forma (perfis primários, P_t - altura total) foi medido usando um perfilômetro (Taylor Hobson, Talysurf 50). Foram analisadas direções paralelas e perpendiculares à direção de avanço/construção. Cinco linhas de perfil paralelas (com um intervalo de 2 mm entre cada uma) foram avaliadas (comprimento de avaliação de 10 mm). Um medidor de faixa ampla (ponta de esfera de rubi com raio de ponta de 500 μm) foi usado para medir o desvio de forma. Em relação ao item (2), as rugosidades da peça após deposição por DED também foram avaliadas pelo microscópio descrito anteriormente, no qual foram medidas em cinco pontos distintos da peça. Para a superfície após a deposição, foi utilizada uma lente objetiva de 10x, com área total de avaliação de 3831 x 3837 μm^2 . Para as peças pós-processadas por fresamento, retificação e MAF, as rugosidades foram medidas usando um rugosímetro (Taylor Hobson, Talysurf 50), com filtro Gaussiano e *cut-off* de acordo com a ISO 4287 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1997). O sensor da ponta de contato (*pick-up*) foi alterado para um adequado para medição de rugosidade e um medidor indutivo (perfil cônico, com ponta esférica de diamante com raio de ponta de 2 μm) foi usado. Cinco medições (4 mm de comprimento e um intervalo de 2 mm entre cada par) foram realizadas e, então, a média e desvio padrão dessas medidas foram calculadas.

Vale destacar que após cada processo, as amostras foram limpas em banho ultrassônico (em álcool isopropílico por 10 min) para as medidas de perda de massa, desvio de forma e rugosidade.

As investigações metalográficas foram realizadas usando um microscópio eletrônico de varredura (JEOL IT-200). As amostras foram cortadas por eletroerosão a fio, embutidas em baquelite, lixadas (granulometria *mesh* na seguinte sequência: 80, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2000), em seguida polidas (pasta de diamante de 1 μm) e atacadas eletroliticamente com ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ - 10% ácido e 90% água destilada) com uma passagem de corrente elétrica próxima de 1 A durante 15 segundos, conforme prática A da norma ASTM A262-15R21 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2021).

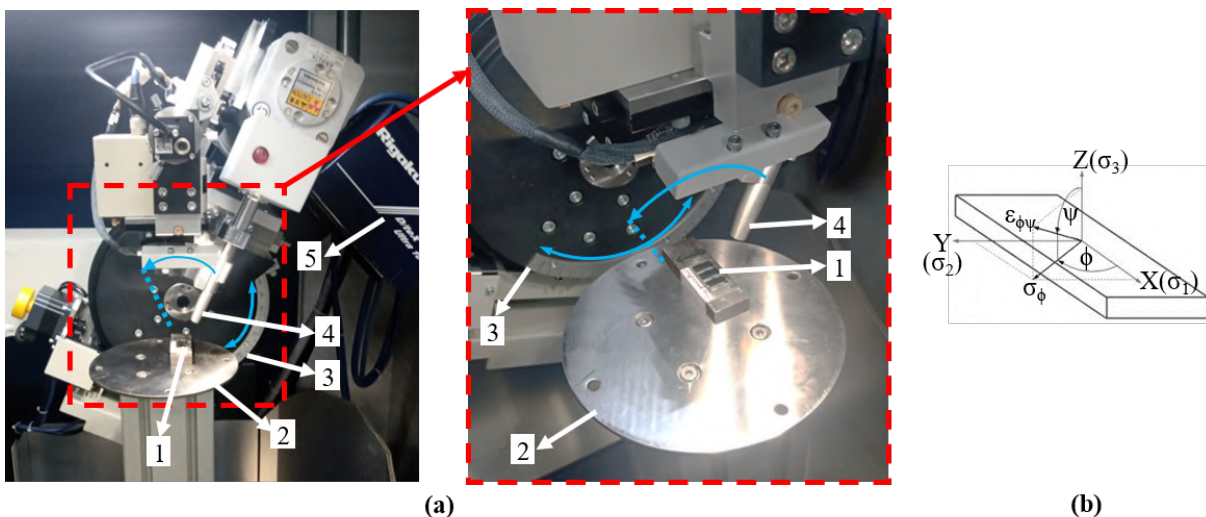
Os testes de dureza Vickers foram realizados utilizando um durômetro (Buehler Modelo 1600 6300), com carga de 0,5 N e tempo de permanência de 15 s, seguindo as normas ASTM E2546-07 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007) e E384-17 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017). As microindentações foram feitas de 50 μm das superfícies pós-processadas até 250 μm (com um intervalo de 50 μm entre elas).

Um difratômetro de raios-x da marca Rigaku, modelo Rint 2000 foi usado para as medições de tensão residual⁶, trabalhando com uma corrente elétrica de 20 mA e tensão de 10 kV e com uma fonte de radiação de cromo (Cr) com um filtro de raios alfa (K_α) de vanádio

⁶ Análises realizadas no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), vinculado à Escola Politécnica da USP.

com comprimento de onda (λ) igual a 229 nm. As amostras foram posicionadas na mesa do equipamento em duas posições diferentes, sendo elas horizontalmente (referida como 0° - transversal à direção de avanço) e verticalmente (referida como 90° - mesma direção de avanço). Na Figura 38 (a) é detalhada a configuração esquemática das medidas de tensão residual. Para verificar a tensão residual na camada superficial superior após cada respectivo processo, nenhuma preparação de superfície foi aplicada antes das medições. O método $\sin^2 \psi$ foi adotado (NOYAN; COHEN, 1987) com 7 valores de ψ entre 0° e 60° (ψ sendo a inclinação do plano de difração e o plano da amostra – ângulo polar ou zenital no sistema de coordenadas esféricas, conforme Figura 38 (b)). Os valores da faixa de varredura (2θ - ângulo variado no goniômetro) variaram entre 126° - 132° e $118,84^\circ$ - $139,04^\circ$, com passos de $0,04^\circ$ e $0,1^\circ$, respectivamente. O pico austenítico 220 foi definido para o pico de difração. O método de inclinação ISO foi utilizado, juntamente com o filtro Savitzky-Golay's. Os valores do módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν) adotados foram 200 GPa e 0,29, respectivamente.

Figura 38 – Esquema da medição de tensão residual e (b) direções da tensão e deformação principais.



- 1) Amostra horizontal (posicionada à 0° , posição transversal/perpendicular à direção de corte/deposição), 2) mesa, 3) círculo goniométrico, 4) tubo de cromo, 5) detector de raios-X.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir, os resultados obtidos nos testes preliminares e definitivos serão apresentados.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Essa Seção foi dividida em duas partes. A primeira é relacionada aos resultados dos experimentos preliminares (denominado de testes-piloto de pós-processamento) e a segunda é referente aos resultados dos ensaios finais (intitulado de testes definitivos de pós-processamento).

4.1 Resultados dos testes-piloto de pós-processamento

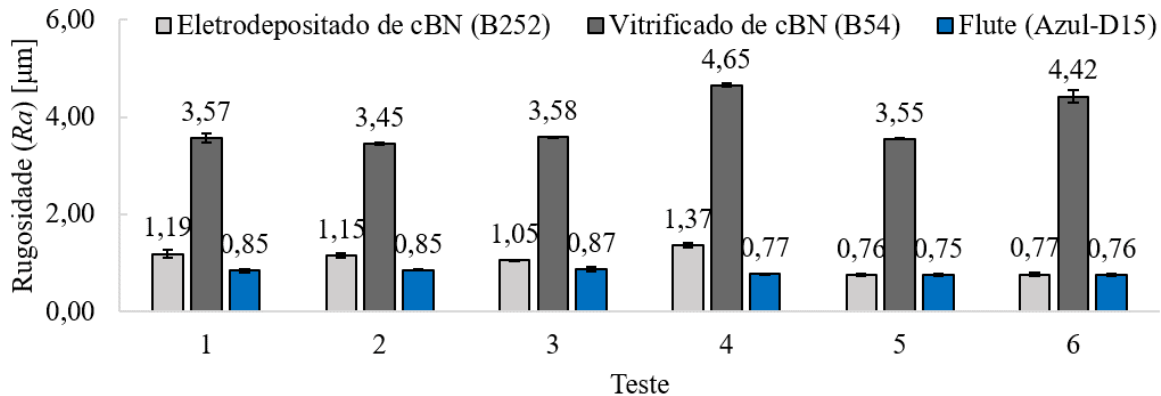
Primeiramente, serão discutidos os resultados do pós-processamento por retificação, no qual os conjuntos de Testes A, B e C foram abordados. Na sequência, os resultados do pós-processamento por fresamento (rotas 1, 2 e 3) serão apresentados.

4.1.1 Retificação

Na Figura 39 são apresentados os resultados quantitativos de rugosidade R_a das amostras após os Testes A de retificação (na Tabela 20 é apresentada as condições de cada teste). Observa-se que o rebolo vitrificado de cBN (B54) foi o que gerou pior qualidade superficial, com níveis de rugosidade entre 3,4 até 4,6 μm . Em alguns casos, esse rebolo causou queima à superfície da peça. O rebolo *Flute* (azul-D15) apresentou os menores valores de rugosidade ($R_a \approx 0,8 \pm 0,05 \mu\text{m}$), porém a depender da aplicação, esses níveis ainda são altos. Além disso, esse rebolo suaviza a superfície advinda do processo anterior, visto que ele possui a função de polimento, com pouca capacidade de remoção de material. Dessa forma, o *Flute* (azul-D15) poderia ser utilizado ao final de uma rota de pós-processamento de peças metálicas produzidas por AM como uma alternativa para polir peças após um processo de desbaste e acabamento por fresas ou rebolos.

Inicialmente, de modo a uniformizar a superfície da peça depositada, operações de

Figura 39 – Rugosidades das amostras planas após os Testes A de retificação.



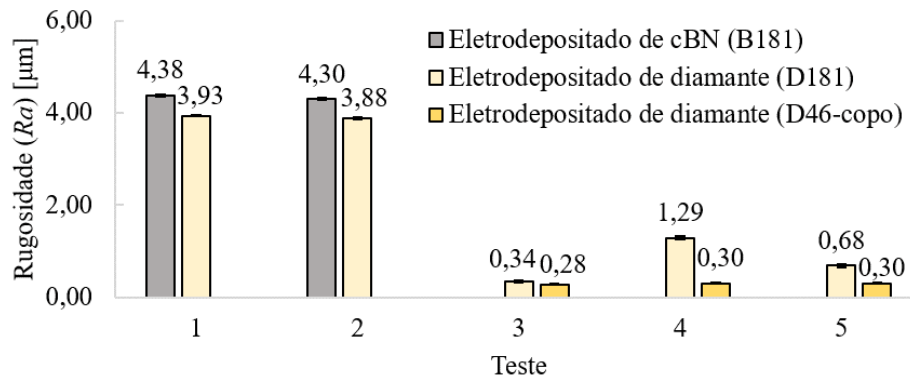
Fonte: Elaborada pelo autor.

desbaste pelo fresamento foram realizadas antes do processo de retificação e a rugosidade após o fresamento de desbaste era próximo de $1 \mu\text{m } R_a$. Dessa forma, os processos de retificação dos Testes A apresentaram pouca eficiência (ou ineficiência) para aumentar a qualidade superficial das peças. Sendo assim, de modo a encontrar ferramentas e condições adequadas para usinagem do aço inoxidável 316L feito por DED foi dada sequência na condução dos experimentos dos Testes B de retificação.

Na Figura 40 são apresentados os resultados de R_a das amostras após os Testes B (as condições estão apresentadas na Tabela 21). Observa-se que os rebolos de superabrasivos (cBN/D181) quando utilizados na retificação tangencial (lateral – testes 1 e 2) alcançaram os piores valores de rugosidade. Tal fato pode ser justificado pela geometria das ferramentas, distribuição dos grãos pelo processo de eletrodeposição, tamanho dos grãos (equivalente a $150\text{--}180 \mu\text{m}$) e incapacidade de dressagem por dressadores de ponta única, entre outros. A dressagem de contato (do inglês, *touch dressing*), com laser e dressadores rotativos são algumas possíveis para correção e afiação desses rebolos. Todavia, para cada uma dessas opções, a instalação de sistemas periféricos e auxiliares na máquina é necessária, demandando recursos tecnológicos e econômicos.

Comparando-se os resultados dos testes 1 e 2 (retificação lateral) e 3, 4 e 5 (retificação de topo) do rebolo eletrodepositado de diamante (D181) (conforme Figura 40), constata-se que a retificação de topo faz com que as peças alcancem menores valores de rugosidade, conseqüentemente, melhor qualidade superficial. Para constatar tal fato, optou-se por utilizar rebolos tipo copo. Cujo qual pode ser encontrado no inventário dos fabricantes, visto que esse tipo de rebolo é utilizado na indústria para afiação de ferramentas de aço. Dessa forma, esse tipo de rebolo pode ser uma alternativa viável para utilização em centros de usinagem (3-5 eixos), sendo necessário a usinagem de uma haste e flange para acoplamento do mesmo no mandril e eixo da máquina. O rebolo eletrodepositado de diamante (D46-copo) foi a ferramenta que conferiu melhor qualidade superficial às peças, com níveis de rugosidade entre $0,28$ e $0,3 \mu\text{m}$

Figura 40 – Rugosidades das amostras planas após os Testes B de retificação.



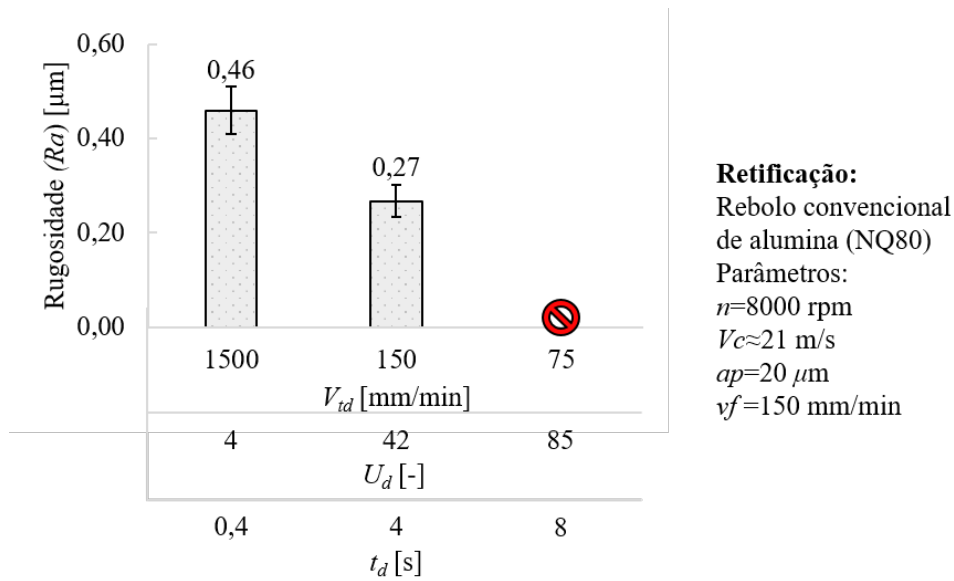
Fonte: Elaborada pelo autor.

R_a . Todavia, por esse rebolo ser de superabrasivo eletrodepositado, a questão da dressagem (conforme discutido anteriormente) ainda é uma limitação para sua aplicação.

Tendo em vista a dificuldade tecnológica e econômica da instalação de sistemas de dressagem de contato, com laser e dressadores rotativos, optou-se pela instalação de um dressador estático de ponta única na máquina. Sendo assim, experimentos para validação desse sistema foram realizados, na qual a velocidade transversal de dressagem (V_{td}) foram alterados, consequentemente, alterando o grau de recobrimento (U_d) e tempo de dressagem (t_d). Conforme [Hassui e Diniz \(2003\)](#), para um menor valor de U_d , a agressividade do rebolo e forças de retificação são menores, consequentemente, a rugosidade para o rebolo/peça é maior. Já para um valor de U_d maior, a agressividade do rebolo e forças de retificação também são maiores, consequentemente, baixas rugosidades são previstas para o processo. Na Figura 41 são apresentados os resultados de rugosidade das peças após variação das condições de dressagem. Conforme esperado, menor valor de U_d gerou a maior rugosidade após retificação. Todavia, a peça retificada com o maior valor de U_d apresentou marcas de queima superficial. Tal fato pode ser justificado pela condição superficial da ferramenta, apresentando estrutura fechada com alta agressividade do rebolo, cujo qual está ligado à porosidade e exposição de grãos abrasivos da ferramenta. Sendo que o maior número de grãos abrasivos atuantes implica em menor quantidade de núcleos vazios (poros), promovendo maior interação ligante/peça e, consequentemente, que levam ao aumento do atrito na região de contato e diminuição da eficiência do transporte de fluido para o local do corte. Assim sendo, ocorre-se a elevação da temperatura de retificação, causando a queima da peça. Dessa forma, o valor intermediário de U_d foi considerado a condição ideal para os testes, no qual apresentou valores de rugosidade menores que $0,3 \mu\text{m } R_a$ sem a presença de queima na superfície das peças.

A análise da perda progressiva da agressividade do rebolo durante a operação (capacidade de remoção de material) e volume desgastado do rebolo (Z_s) (ligado à relação G e vida útil da ferramenta) não foram abordadas nesse estudo. Sendo que o objetivo principal dos testes

Figura 41 – Rugosidades das amostras planas após variação das condições de dressagem.



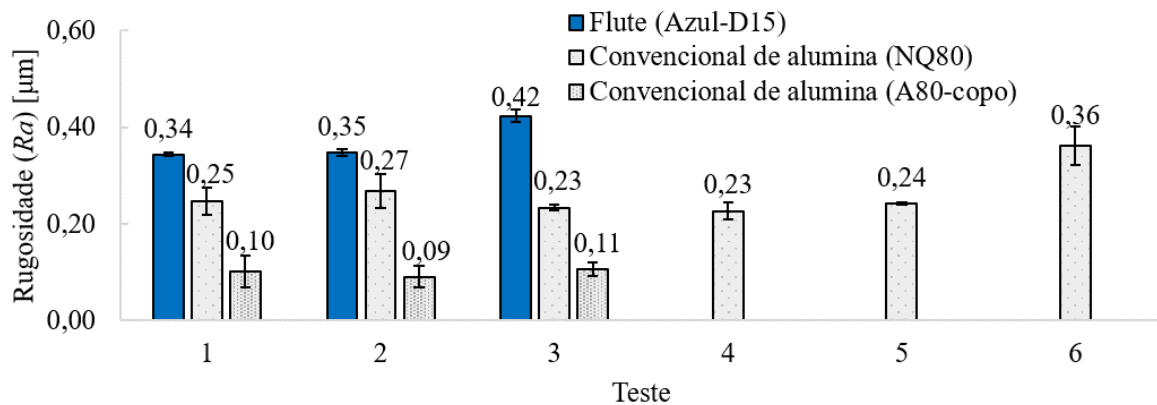
Fonte: Elaborada pelo autor.

realizados foi avaliar o impacto da retificação na qualidade superficial das peças de aço inoxidável 316L produzidas por DED. De modo a garantir a mesma condição inicial para todos os testes, a operação de dressagem foi realizada antes de cada experimento de retificação. Sendo assim, de modo a encontrar ferramentas e condições adequadas para usinagem do aço inoxidável 316L feito por DED, os experimentos dos Testes C de retificação foram realizados em rebolos que possibilitassem a realização de operações de dressagem, e consequentemente, alteração da superfície dos mesmos.

Na Figura 42, as rugosidades das amostras após os Testes C estão apresentadas (as condições de cada teste estão na Tabela 22). Para o rebolo *Flute* (azul-D15), comparando-se os resultados dos Testes A (conforme Figura 39) e C percebe-se que a realização da operação de dressagem é benéfica para a melhoria da qualidade superficial das amostras. Em média, foi alcançado um $R_a \approx 0,80 \pm 0,05$ μm para os Testes A. Já para os Testes C, esse valor foi reduzido pela metade ($R_a \approx 0,37 \pm 0,04$ μm). Dessa forma, fica claro que a possibilidade de condicionamento e alteração superficial do rebolo (correção macro e micro geométrica e agressividade) pela dressagem é essencial para alcançar melhores qualidades superficiais. Vale ressaltar que os testes A e C foram realizados em máquinas diferentes, sendo eles na D800 Hybrid Romi e C800U Hermle, respectivamente. Dessa forma, a melhora da qualidade superficial também pode estar associada ao uso de uma determinada máquina, tendo em visto que cada uma possui uma robustez, precisão e rigidez.

O rebolo convencional de alumina (NQ80) apresentou valores intermediários de rugosidade quando se compara os três rebolos utilizados nos Testes C (ver Figura 42), alcançando $R_a \approx 0,26 \pm 0,05$ μm . O rebolo convencional de alumina (A80-copo) foi a ferramenta que propi-

Figura 42 – Rugosidades das amostras planas após os Testes C de retificação.



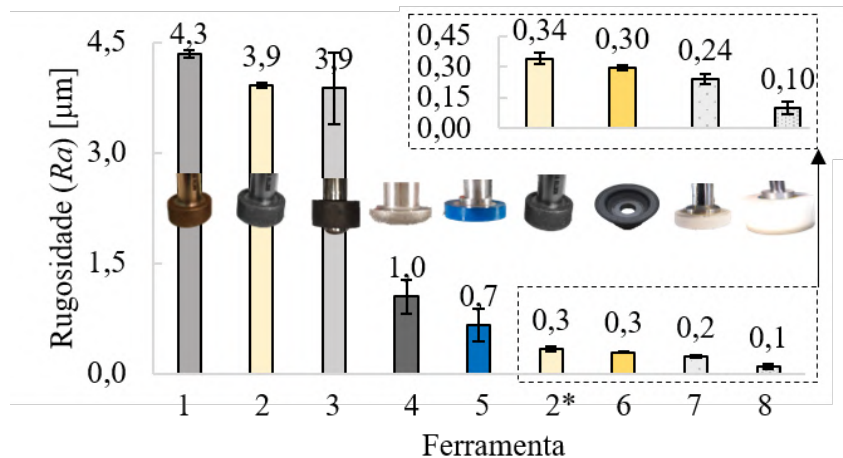
Fonte: Elaborada pelo autor.

ciou melhor qualidade superficial às peças, com níveis de rugosidade próximos de $0,1 \mu\text{m } R_a$. Tal fato pode ser justificado por uma combinação de fatores, tais como: geometria da ferramenta (rebolo tipo copo), tamanho dos grãos e capacidade de dressagem por dressadores de ponta única, entre outros. Para esse rebolo, utilizando-se as mesmas condições dos testes 1, 2 e 3, as peças retificadas com valores de velocidade de avanço (V_f) acima de 600 mm/min apresentaram marcas de queima. Por isso, elas não foram apresentadas. Assim, o rebolo convencional de alumina (A80-copo) foi escolhido como a ferramenta ideal, cujo qual foi utilizado para os testes definitivos de pós-processamento por retificação (conforme será relatado na Seção 4.2).

Na Figura 43 é apresentado um resumo das rugosidades das amostras após os Testes A, B e C de retificação. Dessa forma, uma série de experimentos de retificação foi realizada para explorar a possibilidade de realizar este processo em centros de usinagem. Em alguns casos, a rugosidade final alcançada foi em torno de $4 \mu\text{m } R_a$. Em outros casos, a rugosidade foi inferior a $0,1 \mu\text{m } R_a$. Assim, dependendo dos parâmetros do processo e em particular da especificação da ferramenta e sua condição superficial, os valores de rugosidade resultantes são bem variados. A máquina e a fixação (tanto da peça quanto da ferramenta) também interfere nos resultados, visto que os valores de qualidade superficial são impactados pela precisão, rigidez e estabilidade do sistema. Cabe ao operador definir qual rebolo e condição deve ser utilizada, a depender dos critérios técnicos do projeto. Algumas diretrizes exploradas e definidas pelos testes-piloto podem auxiliar na tomada de decisão, tais como definição do grão abrasivo (tipo e tamanho), ligante, geometria da ferramenta, orientação (lateral ou topo), parâmetros de retificação, dressagem, entre outros.

Por fim, vale destacar que para todos os testes de retificação, a profundidade de corte (a_p) variou entre $5\text{-}30 \mu\text{m}$. Este parâmetro é um dos principais fatores limitantes do processo de retificação em termos de remoção de material; uma vez que os componentes metálicos produzidos por DED não possuem tolerâncias dimensionais e geométricas para atender aos requisitos práticos (valores semelhantes àqueles obtidos por processos de fundição e forjamento),

Figura 43 – Resumo das rugosidades das amostras planas após os Testes A, B e C de retificação.



*Frontal (topo). Especificações dos rebolos: 1) B1-S-1A1W-38-20-20-80-B181, 2) B1-S-1A1W-38-20-20-80-D181, 3) K SS 10 NYE B54 V240, 4) B1-S-1FF1W-35-5-2,5-47-6,35-B252, 5) 1A1 33-5-10-9 D15 Q-FLUTE, 6) D46-V-PRO4073, 7) NQ80-L-10VS3, 8) 101,60-50,80-31,75 ACR FE 38A80 k

Fonte: Elaborada pelo autor.

vários passes de retificação podem ser necessários para corrigir esses erros, o que pode ser dispendioso em termos de tempo e custo. Para superar este desafio, uma operação intermediária de pós-processamento (por exemplo, fresamento ou retificação de desbaste) entre o processo de deposição e retificação de acabamento pode ser necessária. Nesses casos, a retificação de acabamento pode ser utilizada como processo final de usinagem para produzir peças elevada qualidade superficial (em termos de rugosidade e tolerâncias dimensionais). Outra dificuldade na integração do processo de retificação em centros de usinagem é a implantação de sistemas auxiliares e periféricos dentro da máquina. Por exemplo, sistemas de dressagem com dressadores rotativos são recomendados por serem eficientes para rebolos superabrasivos, mas requerem alguns subsistemas (por exemplo, motor, ar comprimido, disco dressador eletrodepositado, entre outros), sendo mais caro e difícil de implementar em relação à dressagem de rebolos convencionais (já que a dressagem pode ser realizada com dressadores estáticos). Em relação ao fluido de corte, as bombas instaladas em centros de usinagem costumam ser menos potentes do que aquelas comercializadas industrialmente em máquinas retificadoras dedicadas. Portanto, se o sistema de refrigeração (bomba/bico) não for eficiente, pode resultar em maior dano térmico ao componente retificado. Dessa forma, a implementação de sistemas periféricos e auxiliares na máquina, tais como sistema de emissão acústica, sistema de fixação adequados (minimizar erros de batimento), sistema adequado de dressagem e refrigeração, desenvolvimento de novos rebolos, entre outros, são fundamentais para monitorar e aumentar a eficiência do processo de retificação. Nesse sentido, pode-se ressaltar que a adoção desses demanda recursos tecnológicos e econômicos, mas podem resultar em um processo adequado à aplicação.

A seguir serão apresentados os resultados dos testes de fresamento e polimento por MAF para as duas rotas de processamento descritas. Por fim, os resultados da rota de fresamento nº 3

serão apresentados.

4.1.2 Rota de processamento nº 1

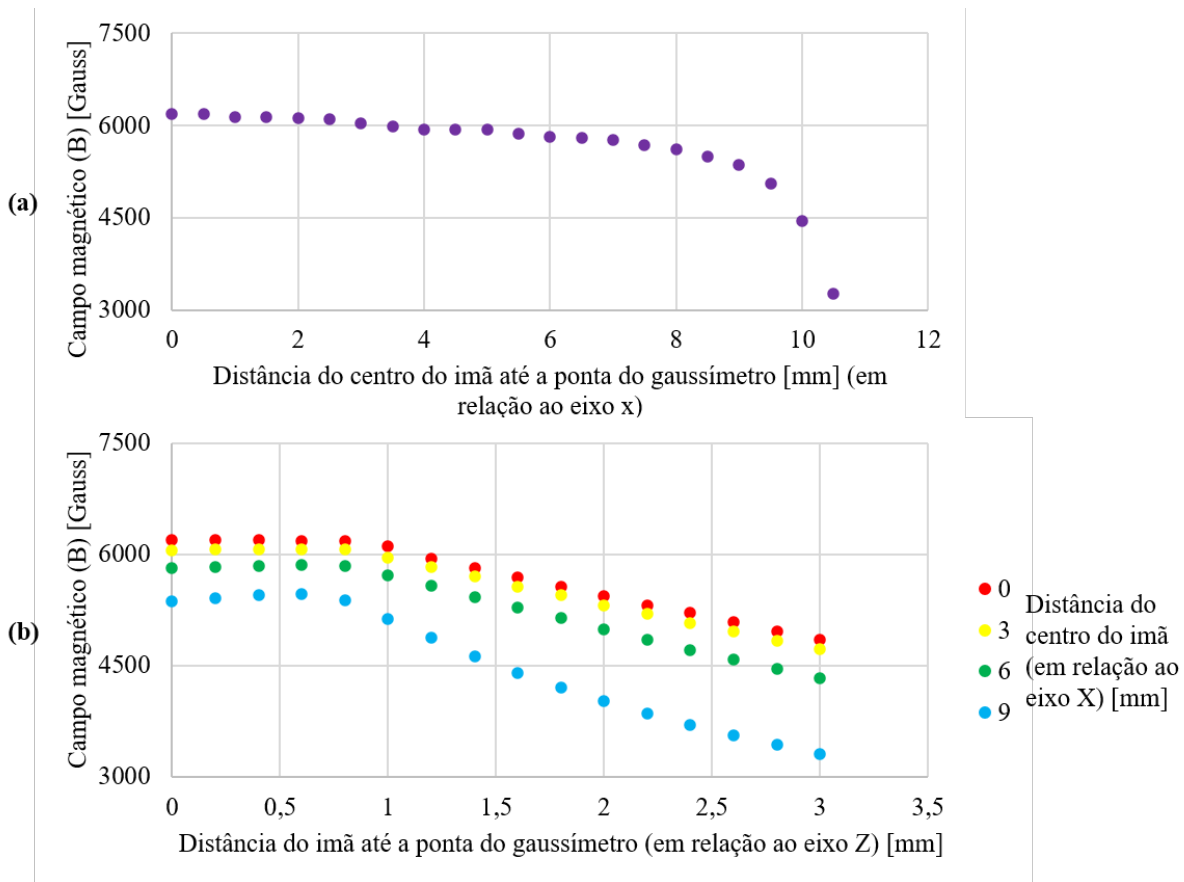
A rota de processamento nº 1 é dada seguinte sequência de operação: DED (configuração A de deposição), fresamento (rota de fresamento 1) e MAF (dispositivo da versão (1#), com rota de MAF 1).

O polimento magnético abrasivo é um processo que remove mecanicamente o material da peça por abrasivos pressionados contra a superfície alvo com partículas magnéticas suspensas em um campo magnético, sendo assim considerado um processo de cópia sob pressão. No MAF, o componente dominante da força de polimento é a força magnética que atua nas partículas magnéticas. A força magnética que atua nas ferramentas magnéticas é um produto do volume e da suscetibilidade¹ do material das partículas magnéticas e da intensidade do campo magnético (ver Equações 2.14 e 2.15). Portanto, os parâmetros relacionados às forças magnéticas são selecionados a depender da força magnética necessária e desejada (ou seja, a força de polimento). Nesse sentido, na Figura 44 é apresentado o resultado da medição do campo magnético (B) para realização do MAF em superfícies planas (conforme configurações apresentadas na Figura 33). De acordo com a Figura 44 (a), nota-se que o campo magnético é mais forte no centro dos ímãs e decai conforme aproxima-se da borda dos ímãs. Observa-se na Figura 44 (b) que o campo magnético é mais forte próximo ao ímã e conforme afasta-se é diminuído. Os resultados evidenciam como as forças magnéticas são formadas e o modo como a escova flexível é alterada de acordo com a distância até o centro do ímã e a distância entre o ímã e a peça, modificando as condições de remoção de material e capacidade de polimento.

Na Figura 45 é apresentado o aspecto visual das peças obtidas após cada processo de manufatura. Após o DED (Figura 45 – (a)), os contornos dos cordões de deposição são visíveis. A superfície fresada (Figura 45 – (b)) apresenta marcas de avanço no sentido de corte da ferramenta, o qual é inerente ao processo. Por último, a superfície após o processo de polimento magnético abrasivo (Figura 45 – (c)) possui um aspecto espelhado, no qual as marcas de avanço do fresamento foram removidos. Tal fato indica, qualitativamente, que as características superficiais foram alteradas por meio dos processos, o qual interferem diretamente no desempenho funcional da peça. As Figuras 45 (d-f) apresentam as imagens obtidas via microscopia confocal ao término de cada etapa de fabricação, com aumento de 20x. Na Figura 45, (d) observa-se a presença de grãos de pós semifundidos aderidos à superfície da peça. Tal fato contribui para a piora da qualidade superficial. Na Figura 45 (e), é possível visualizar as marcas de avanço da ferramenta de corte no fresamento. Na Figura 45 (f) é indicado que as marcas de avanço do fresamento foram removidas e nova textura surgiu devido à interação abrasivo-peça, apresentando padrões direcionais finos paralelos à direção de deslizamento do abrasivo. Tal fato está de acordo com a literatura da área Hashimoto *et al.* (2016).

¹ Capacidade do material de magnetizar-se por um campo magnético.

Figura 44 – Resultado do campo magnético no dispositivo para polimento de peças planas.



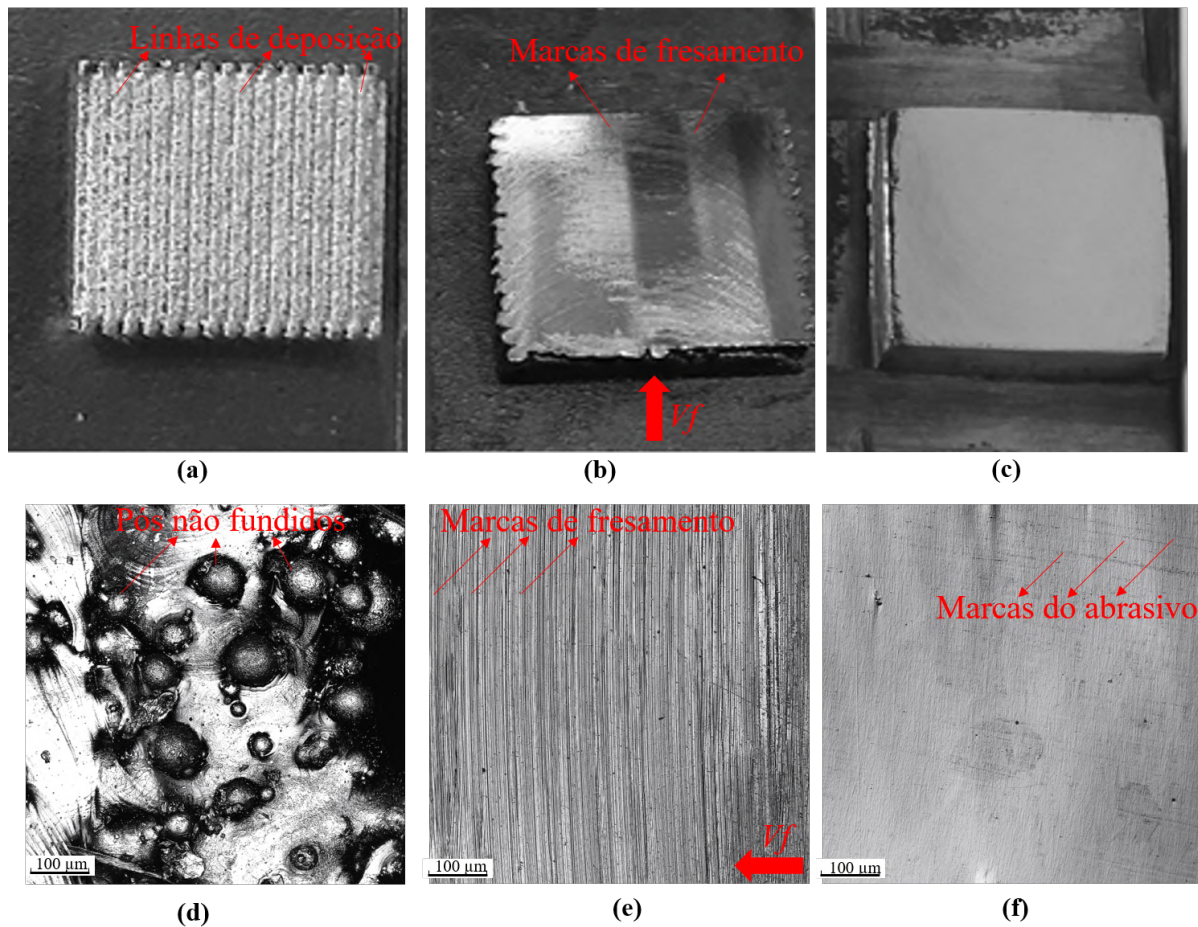
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 46 são apresentados os valores de rugosidade (R_a e R_z) obtidos após cada processo. Nota-se uma redução da rugosidade R_a de $56,06 \mu\text{m}$ da amostra após DED para $0,08$ e $0,03 \mu\text{m}$ para o fresamento (FVc300) e polimento (MAF15). Já para a rugosidade R_z , o valor inicial de $242,80 \mu\text{m}$ foi reduzido para $0,56$ e $0,24 \mu\text{m}$ para o fresamento (FVc300) e polimento (MAF15), respectivamente.

A peça depositada via DED possui rugosidades R_a e R_z de $56,06$ e $242,80 \mu\text{m}$, respectivamente. Sendo esses valores compatíveis com aqueles relatados por Huckstepp (2019). Segundo DebRoy *et al.* (2018), a elevada rugosidade das peças fabricadas por DED se deve a diversos fatores, tais como: morfologia/geometria dos cordões de deposição, fenômeno de *balling* (material líquido não adere o substrato adjacente devido à tensão superficial), presença de pós semifundidos aderidos à superfície, entre outros.

Durante as operações de fresamento, a variação da V_c entre 300 e 500 m/min causou variação na rugosidade R_a de $0,07$ até $0,11 \mu\text{m}$ e R_z de $0,53$ até $0,73 \mu\text{m}$ (vide Figura 46). Pode-se ressaltar a elevada qualidade superficial alcançada pelo fresamento. Todavia, conforme Tabela 19, o avanço por dente (f_z) e profundidade de corte (a_p) utilizados foram menores que aqueles recomendados pelo fabricante, sendo o f_z 25 vezes menor que o valor máximo recomendado e a_p

Figura 45 – Aspecto visual e análise topográfica das superfícies planas após cada etapa de manufatura (aumento de 20x): (a) e (d) DED, (b) e (e) fresamento (FVc300), e (c) e (f) MAF (MAF15).

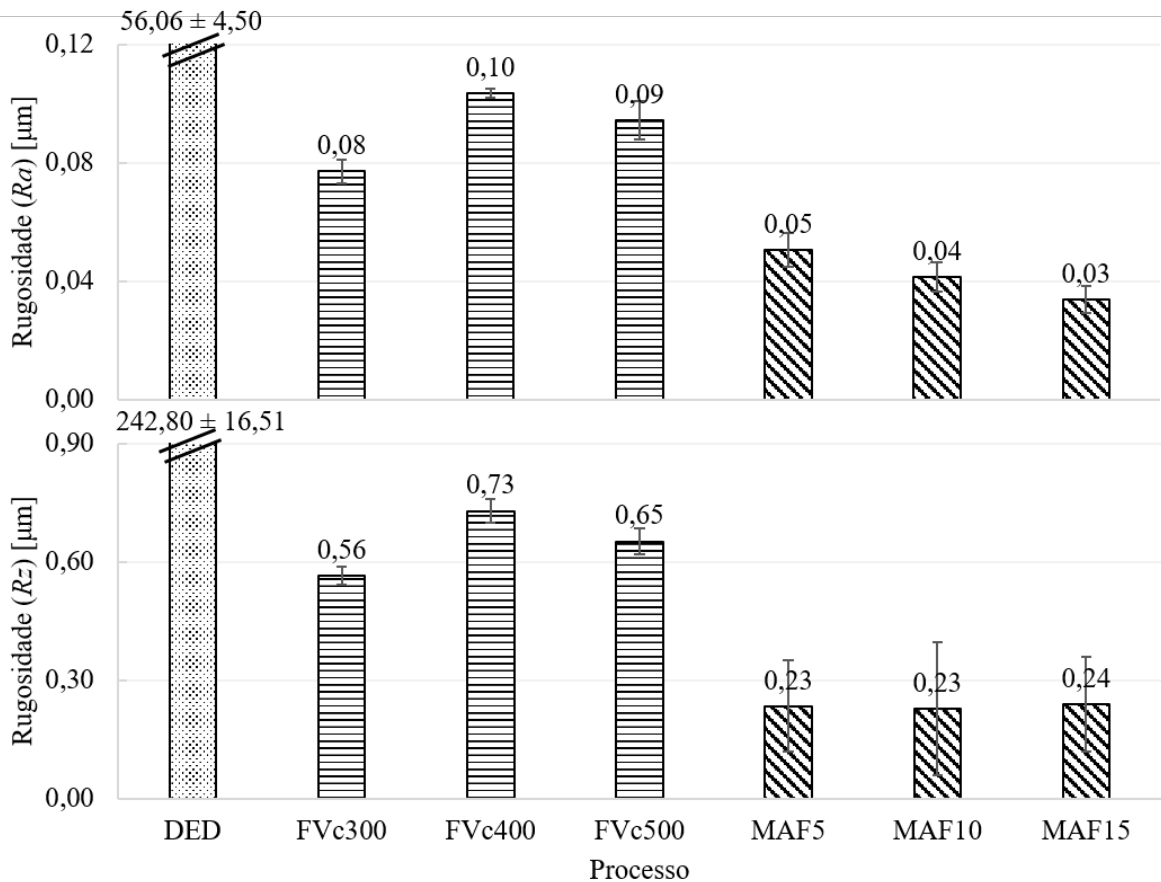


Fonte: Elaborada pelo autor.

até 8 vezes menor. A eficiência do processo de fresamento na questão da capacidade de remoção de material e tempo de processamento foram abordados nas outras rotas de pós-processamento. O objetivo desse conjunto de testes foi gerar superfícies com rugosidade (R_a) abaixo de $0,1 \mu\text{m}$ pelo fresamento, de modo a verificar o comportamento do processo de polimento nessa faixa de rugosidade.

Como pode ser visto na Figura 46, o MAF possibilitou a geração de superfícies com rugosidades R_a entre $0,03$ e $0,05 \mu\text{m}$ e R_z próximo de $0,23 \mu\text{m}$. Isso representa a capacidade do processo em obter níveis nanométricos de rugosidade, superando aqueles obtidos por fresamento. Para o tempo de processamento acima de 15 minutos, a redução de rugosidade torna-se pequena (limite do processo), tornando o processo pouco eficiente para diminuição da rugosidade. Nota-se também que a rugosidade R_z manteve-se constante durante o polimento. Isso ocorre principalmente porque o processo alcançou seu limite e as partículas abrasivas (diâmetro médio de $0,05 \mu\text{m}$) tem dificuldade em alcançar o fundo dos vales mais profundos. Para uma maior redução desses valores, alguns parâmetros e condições do processo devem ser alterados, tais como tipo e tamanho do abrasivo, tamanho das partículas magnéticas, campo e forças magnéticas, polo

Figura 46 – Rugosidades das superfícies planas após cada operação na rota de processamento nº 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

magnético, rotação (relacionada à velocidade de corte), velocidade de deslocamento (avanço) da ferramenta, entre outros.

Em relação à cadeia produtiva, o tempo ativo de processamento para fabricação dos corpos de prova utilizando o DED foi de 337,5 s. Para o fresamento, na melhor condição (M300), o tempo ativo de usinagem foi 90 s. Para o MAF, no maior tempo de processamento, demorou 900 s. Desta forma, a rota de processamento ótima exigiu um total de 1327,5 s (aproximadamente 22 min).

Em relação ao tempo de processamento, Yamaguchi, Fergani e Wu (2017) utilizaram o MAF para polir peças de 316L SS feitas por SLM, no qual gastaram um total de 240 min de processamento para reduzir a rugosidade R_z de 102,1 para 0,1 μm . Considerando que a peça feita por DED possui mais que o dobro de rugosidade ($R_z = 242,8 \mu\text{m}$) da peça feita por SLM, utilizando-se as mesmas condições de acabamento, pode-se inferir que seria necessário maior tempo de processamento para alcançar a mesma qualidade superficial, resultando em até 330 min (5,5 horas). Sendo assim, de modo a alcançar tolerâncias nanométricas de rugosidade em menores tempos de fabricação, pode-se inferir que a utilização do fresamento como uma etapa

de pós-processamento intermediária mostra-se como uma alternativa viável para diminuição do tempo global de processamento pelo polimento, resultando em uma cadeia produtiva mais sustentável.

A fim de fornecer uma manufatura eficaz (por exemplo, tempos de fabricação curtos e alcançar a precisão desejada da peça), a integração de processos de acabamento abrasivo em um centro de usinagem é uma abordagem razoável. As limitações para o uso de ferramentas abrasivas em um centro de máquina tradicional são (1) baixa rotação do fuso, (2) falta de vedação e proteção para detritos abrasivos em guias ou componentes móveis e (3) disponibilidade limitada de projetos de ferramenta, e esses desafios precisam ser superados para lançar um centro de usinagem de três ou cinco eixos no mercado. Atualmente, já existem centros de usinagem com essa tecnologia, por exemplo as estações de trabalho híbrida (no qual envolvem processos de adição e subtração). Tais centros de usinagem capitalizam as vantagens do DED – como a capacidade de fabricar geometrias complexas – ao mesmo tempo em que incorpora um processo usinagem (podendo agregar operações que envolvam desde o desbaste inicial até etapas finais de polimento para dar acabamento à peça produzida).

Em termos da sequência dos processos de manufatura para aplicações médicas (como é o caso do aço inoxidável 316L), [Abellán-Nebot *et al.* \(2012\)](#) citam que a sequência típica envolve um processo de formação (forjamento, sinterização ou fundição), seguido de processos de usinagem (fresamento, torneamento e retificação) e, por fim, processos de acabamento (manuais ou automáticos). Considerando o tempo para fabricação das matérias-primas e condições de processamento, essa rota tradicional pode demorar alguns dias para ser completada. A natureza tecnológica de fabricação das matérias-primas de MA e do próprio processo de deposição pode resultar em uma redução do tempo total de processamento para horas, indicando uma possível rota inovadora que possibilite a manufatura de peças que atenda a todos os aspectos funcionais que a mesma necessite.

Com a atual tecnologia, tendo em vista que a máquina D800 Hybrid possui um cabeçote para deposição de peças por DED, é possível realizar todos os processos (DED, fresamento e MAF) em única máquina. Dessa forma, a manufatura híbrida tem o potencial de otimizar a rota produtiva como um todo, melhor aproveitando as vantagens individuais de cada processo.

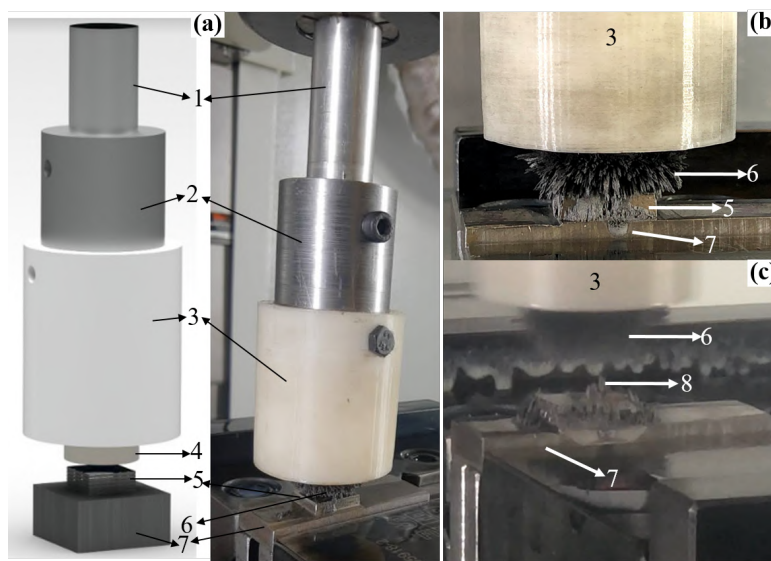
4.1.3 Rota de processamento nº 2

A rota de processamento nº 2 é dada seguinte sequência de operação: DED (amostras depositadas pela configuração B), fresamento (rota de fresamento 2) e MAF (dispositivo da versão (2#), com rota de MAF 2).

Tendo a vista a possível combinação de diferentes operações de pós-processamento (fresamento, retificação e MAF) em um único centro de usinagem, o polimento magnético abrasivo foi incorporado em centros de usinagem adicionando a ferramenta de corte (composta

por ímãs permanentes que suspendem a escova flexível de partículas magnéticas abrasivas). Na Figura 47 (a) é apresentada a ferramenta composta por ímãs permanentes desenvolvida. Três ímãs ($\varnothing 22 \times 10$ mm) foram acoplados dentro de uma caixa de ácido polilático (PLA), e a caixa impediu que os ímãs oscilassem durante o polimento em altas velocidades de rotação. Uma mistura de partículas magnéticas e abrasivos foi anexada ao ímã e formou uma escova flexível de partículas ao longo das linhas do campo magnético. Nas Figuras 47 (b) e (c) são detalhadas a escova flexível próxima à peça e distante da peça, respectivamente. Nas quais é possível observar a formação da cadeia de partículas que é criada pela interação das partículas magnéticas no campo magnético.

Figura 47 – Ferramenta MAF desenvolvida (a), detalhe da escova flexível próxima à peça (b) e distante da peça (c).



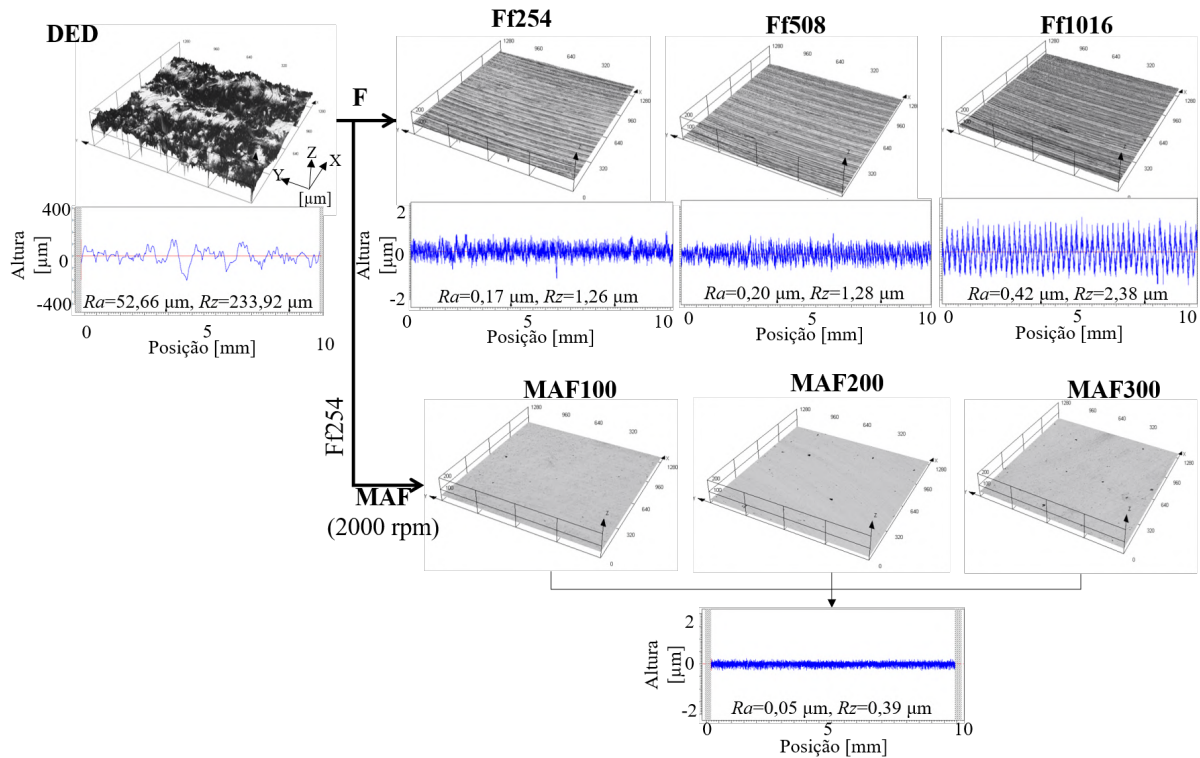
- 1) Cilindro (alumínio), 2) suportes magnéticos (aço AISI 1020), 3) invólucro de PLA para ímãs, 4) ímãs (Nd-Fe-B (N52)), 5) amostra (aço inoxidável 316L-DED), 6) escova flexível, 7) substrato (aço AISI 1020), 8) cadeia de partículas

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 48 é apresentado o aspecto visual da superfície obtida para cada etapa de fabricação da rota de processamento utilizada, com seus respectivos perfis de rugosidade. Observa-se que a superfície DED apresenta picos e vales elevados, nos quais foram suavizados pelas operações de fresamento. Percebe-se que a superfície fabricada pelo MAF apresentou uma suavização ainda maior nos picos e vales. Tal fato se deve à ação das forças magnéticas agindo sobre a escova flexível e o movimento relativo entre a peça e este, promovendo a ação abrasiva dos grãos de alumina e, conseqüentemente, as protusões/picos foram suavizadas, melhorando a qualidade superficial.

Na Figura 49 são apresentadas as rugosidades (S_a e S_z) obtidas pelo DED após as operações de fresamento, no qual ocorreu uma variação dos valores entre $0,16-0,37 \mu\text{m } S_a$ e $1,49-2,85 \mu\text{m } S_z$. Observa-se que o aumento da velocidade de avanço no fresamento causou uma piora na qualidade superficial, conforme as literaturas da área [Trent e Wright \(2014\)](#), [Machado et](#)

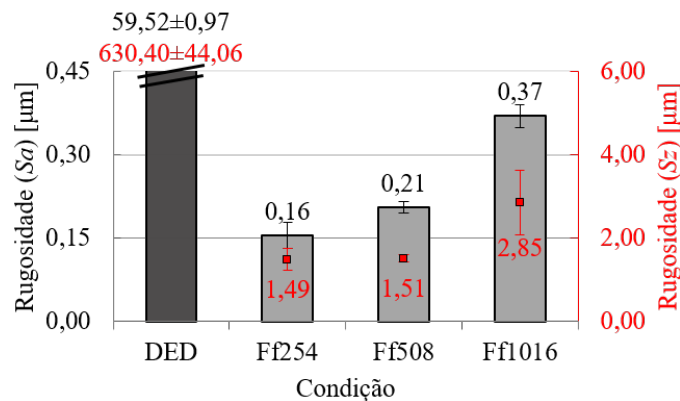
Figura 48 – Topografia e perfis de rugosidade das superfícies planas após cada operação na rota de processamento nº 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

al. (2015). De modo a diminuir o tempo de polimento, o processo de MAF foi realizado apenas nos corpos de prova usinados na condição que gerou menor rugosidade, sendo este o Ff254.

Figura 49 – Rugosidades das superfícies planas após DED e fresamento.

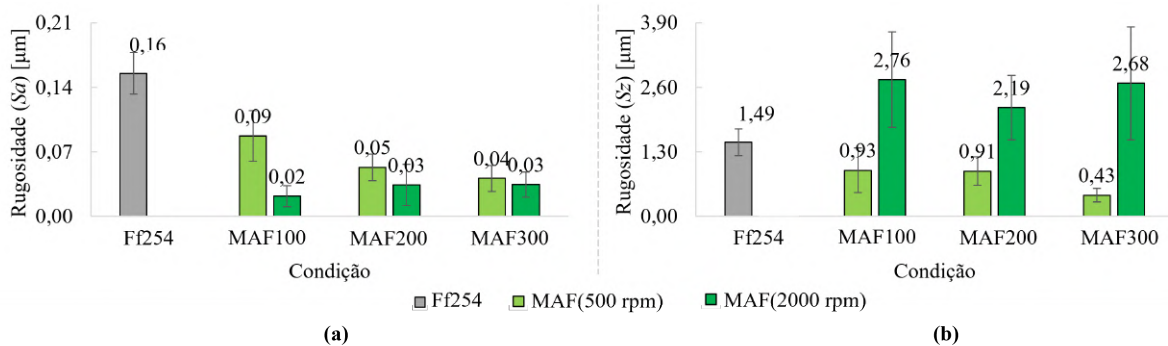


Fonte: Elaborada pelo autor.

Tendo em vista que a redução do tempo de polimento é uma estratégia chave do pós-processamento de peças fabricadas por DED, o impacto da rotação e o tempo de polimento na qualidade superficial das amostras foram avaliados. Na Figura 50 é apresentada os valores de

rugosidade (S_a e S_z) para os corpos de prova fresados na condição Ff254 e polidos por MAF em diferentes tempos (100, 200 e 300 s), com duas rotações (500 e 2000 rpm).

Figura 50 – Rugosidades das superfícies planas após fresamento (Ff254) e MAF: S_a (a) e S_z (b).



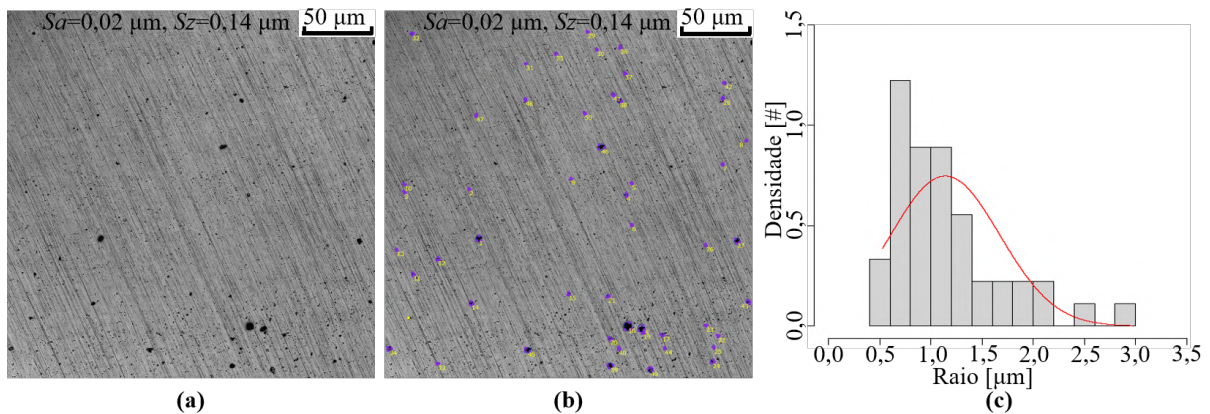
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 50 (a) são apresentados os valores de S_a para as amostras manufaturas por DED. Durante o MAF com a rotação dos imãs em 500 rpm, observa-se que em apenas 100 s de processamento, a rugosidade atingiu o valor de $0,09 \mu\text{m}$, representando uma redução de 44% quando comparado ao material fresado. Com o aumento do tempo de processamento, a rugosidade foi decrescendo até o valor de $0,04 \mu\text{m}$ em 300 s de processamento, atingindo níveis nanométricos que seriam difíceis de serem alcançadas pelo processo tradicional de fresamento (seriam necessárias máquinas, ferramentas e condições especiais para atingir tal nível). Durante o MAF com a rotação dos imãs em 2000 rpm, em apenas 100 s de polimento, a rugosidade S_a atingiu uma média de $0,02 \mu\text{m}$. Tal valor é estatisticamente semelhante (com base nos desvios padrões) aos valores de rugosidade alcançadas pelas amostras polidas em 200 e 300 s. Dessa forma, fica evidente que o desenvolvimento do dispositivo feito para acoplar os imãs possibilitou a realização do MAF em altas rotações com segurança e eficiência, diminuindo o tempo de processamento.

Na Figura 50 (b), os valores de S_z para as amostras manufaturas por DED são apresentados. Durante o MAF com a rotação dos imãs em 500 rpm, observa-se que em apenas 100 s de processamento, a rugosidade atingiu o valor de $0,93 \mu\text{m}$, representando uma redução de 38% quando comparado-se ao material fresado. Com a continuação do polimento, a rugosidade foi decrescendo até o valor de $0,43 \mu\text{m}$ S_z em 300 s de processamento. Sendo assim, para essa rotação, o MAF apresentou capacidade de suavizar superfícies por meio de abrasivo pressionado por uma escova flexível de partículas magnéticas em um campo magnético. Durante o MAF com a rotação dos imãs em 2000 rpm, a qualidade superficial das amostras foi prejudicada, na qual ocorreu um acréscimo, em média, de 70% S_z quando comparada à rugosidade da superfície fresada. Dessa forma, transladar a escova de partículas sobre a superfície em velocidades de corte (acabamento) mais rápidas permitiu que mais material fosse removido em menos tempo, mas ocorreu a criação de pites (pequenas crateras) na superfície polida, aumentando a rugosidade S_z , conforme pode ser observado na Figura 51. Na Figura 51 (a), é possível observar os pites em

uma superfície fresada (Ff254) e polida (após 300 s de polimento com rotação de 2000 rpm). Os pites apresentaram geometria predominantemente circular, nos quais suas dimensões foram observadas em microscópio confocal. Por meio da análise geométrica de 50 pites (conforme indicados na Figura 51 (b)), a distribuição dos tamanhos dos pites foi realizada. Nota-se que esses defeitos superficiais apresentaram um valor médio de raio igual a $1,1 \pm 0,5 \mu\text{m}$. Uma análise por MEV da superfície pode ajudar a verificar o formato e caracterização das crateras. Tais pites podem ser resultados do contato agressivo das partículas abrasivas da escova flexível na superfície da peça e/ou também podem estar associados a defeitos decorrentes do processo de deposição.

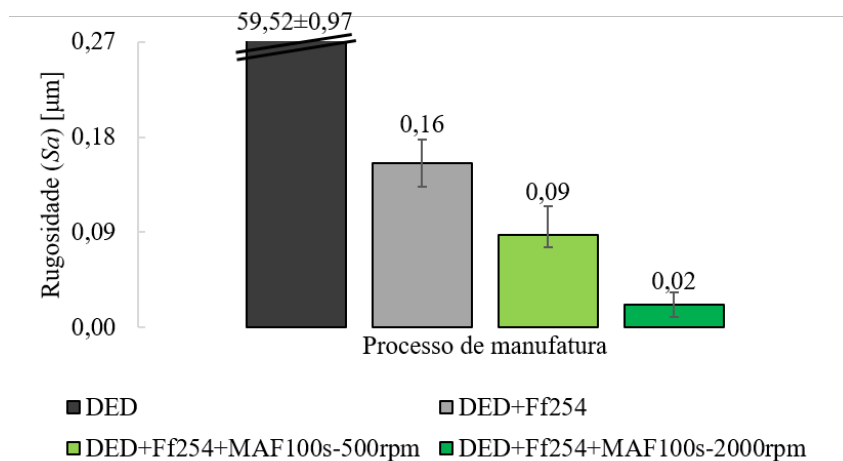
Figura 51 – (a) Pites superficiais após MAF, (b) pites analisados e (c) distribuição dos tamanhos dos pites.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 52 é apresentada a rugosidade alcançada por cada etapa da sequência de fabricação. Nota-se uma redução da rugosidade S_a de $56,06 \mu\text{m}$ da amostra depositada para $0,16$ e $0,02 \mu\text{m}$ para o fresamento (Ff254) e polimento (MAF100s-2000 rpm), respectivamente.

Figura 52 – Rugosidades das superfícies planas após cada etapa na melhor sequência de fabricação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 53 é apresentado um aspecto qualitativo e quantitativo da superfície obtida para cada etapa da rota de fabricação. O aspecto geral das superfícies das amostras feitas por DED e fresamento já foram discutidas anteriormente. Nota-se que a superfície polida em 500 rpm em 100 s ainda apresenta marcas de avanço do fresamento, apesar de terem sido suavizados. Na sequência, essas marcas foram removidas, na qual novas texturas surgiram devido à interação abrasivo-peça, apresentando padrões direcionais finos paralelos à direção de deslizamento do abrasivo (conforme já discutido anteriormente). Para a rotação de 2000 rpm, as marcas de fresamento já foram removidas em 100 s de processamento e não houve uma diferença qualitativa entre as superfícies para os demais tempos de processamento. Todavia, ocorreu a criação de pites.

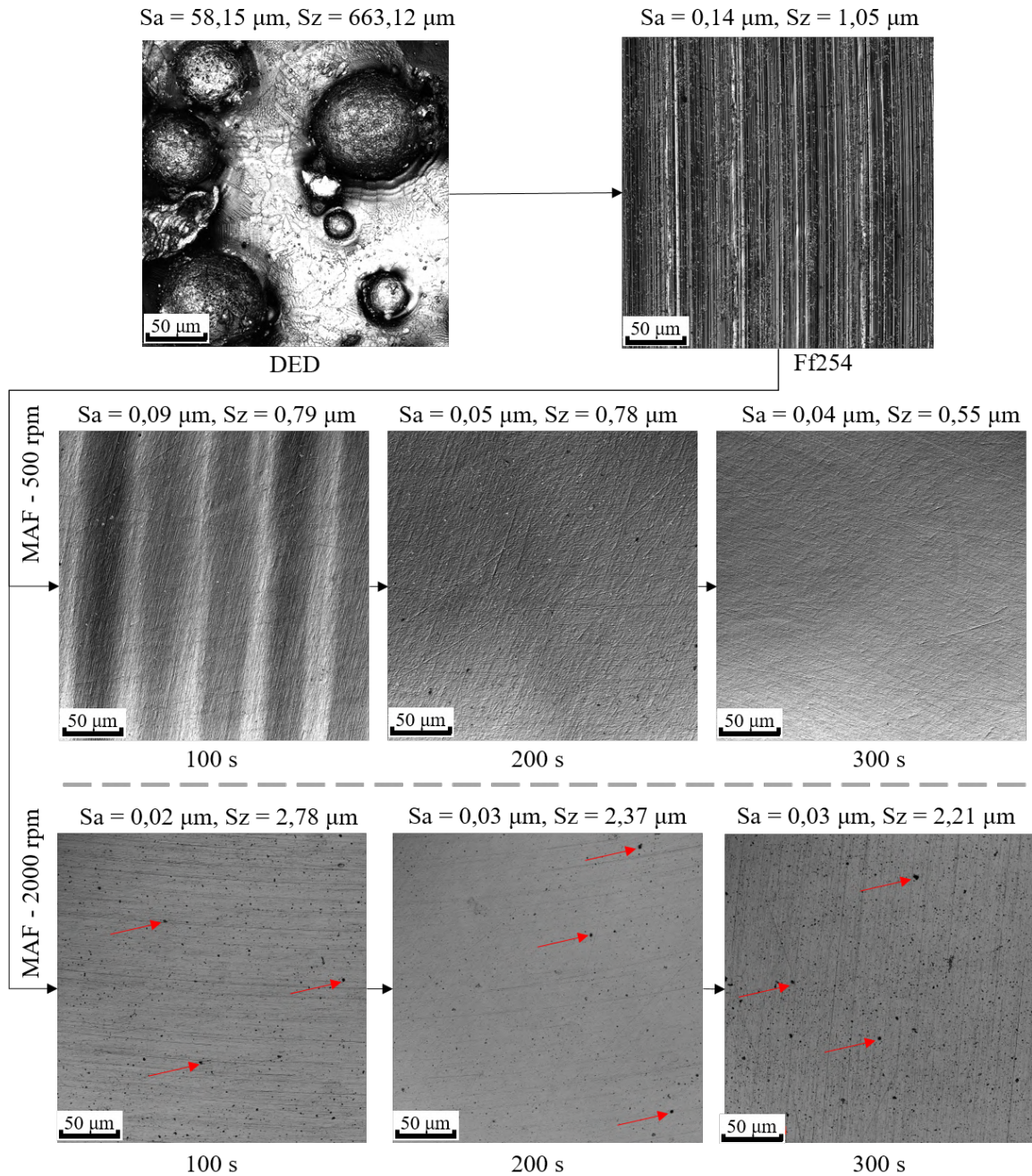
Na Figura 54 são apresentadas as topografias superficiais das amostras após 300 s, sendo essas obtidas na lateral esquerda, centro e direita da região central das mesmas. Comparando-se as duas rotações analisadas, ambas produziram uma superfície com melhor acabamento no centro da amostra. No entanto, as bordas do corpo de prova não foram totalmente polidas em nenhum dos casos, e a região não polida foi maior na rotação do fuso de 2000 rpm do que a 500 rpm. Isso pode estar associado ao “efeito de borda” (diferente densidade de fluxo magnético no centro e na borda do ímã - ver Figura 44) e ao movimento rotacional da escova magnética (diferente força de corte no centro e na borda do ímã devido à velocidade relativa e força em movimento circular) (ZOU; XIE; ZHANG, 2020). Nas condições utilizadas, o diâmetro do ímã (\varnothing 22 mm) foi maior que a área de superfície da peça ($15 \times 20 \text{ mm}^2$ – peças fabricadas com a configuração A, conforme descrito na Tabela 18). Conforme apresentado na Figura 47 (c), uma vez que o ímã se aproximou da peça, algumas partículas, especialmente aquelas localizadas perto da área correspondente fora da amostra, foram atraídas pelo substrato de aço e formaram cadeias de partículas com o substrato de aço em vez de girar com o ímã. Como resultado, a área polida foi reduzida, pois apenas partículas próximas à região interna do ímã participaram da ação de polimento. Esta tendência ficou mais evidente em rotações elevadas. Assim, concluiu-se que o aumento da rotação leva a um incremento da taxa de remoção de material e, conseqüentemente, melhor qualidade superficial em menor tempo de polimento. Em contrapartida, ocorre a redução da área polida.

Para realizar o MAF em alta velocidade, o campo magnético que controla o comportamento da escova flexível foi modificado para satisfazer os seguintes requisitos:

- Focar o campo magnético em direção à área de superfície alvo, e
- Evitar o contato direto da escova de partículas com o substrato de aço para evitar a quebra da escova flexível.

Para satisfazer o primeiro requisito, uma ponta de polo (aço AISI 1020, \varnothing 12 \times 5 mm) (a face final é menor que a área alvo) foi anexada aos ímãs. Para satisfazer o segundo requisito,

Figura 53 – Topografia das superfícies planas após cada etapa da sequência de fabricação.

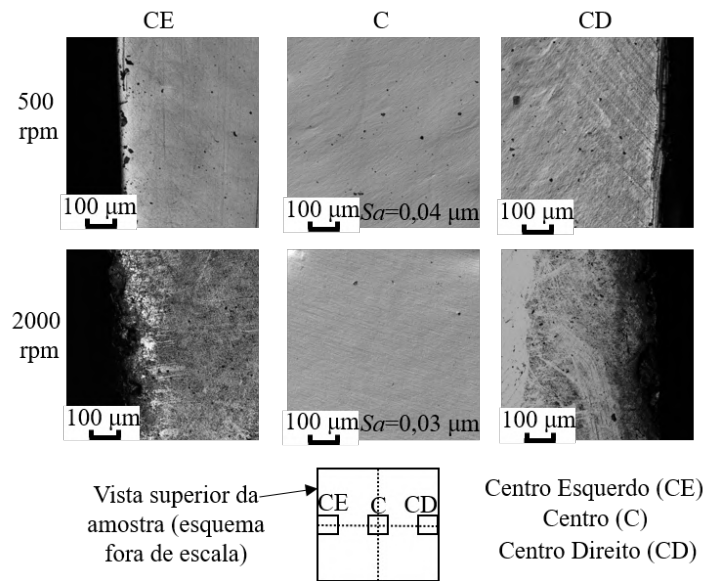


As setas em vermelho indicam os pites. Devido à presença de várias dessas imperfeições na superfície, apenas algumas foram indicadas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

blocos falsos de alumínio foram colocados ao lado da peça de trabalho para interromper o contato direto da escova de partículas com o substrato de aço sem perturbar o campo magnético na área de polimento. A eficácia dessas modificações no comportamento de escova de partículas em velocidades de fuso aumentadas (6000 rpm) foi testada por um teste de estabilidade de escova de partículas. Para esse teste, foram utilizadas as amostras depositadas com dimensões de $12 \times 12 \times 8 \text{ mm}^3$ (peças fabricadas com a configuração B, conforme descrito na Tabela 18).

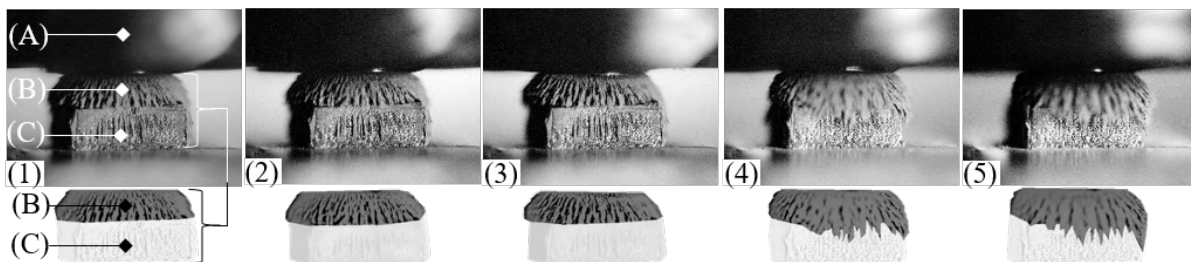
Figura 54 – Micrografias da superfície da peça após polimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tendência de redução de área polida em maiores rotações elevadas é apresentada na Figura 55, na qual o comportamento da formação da escova flexível foi observada. Ao contrário da Figura 47 (c), todas as partículas formaram uma escova de partículas que cobriu a área polida. Aumentar a rotação cria maior força centrífuga nas partículas. Isso causou dois efeitos principais na formação da escova de partículas: um efeito de estrangulamento próximo à ponta do polo e um aumento do diâmetro da escova de partículas, algumas das quais deslizam ao longo da lateral da amostra. Como resultado, menos partículas se engajaram na superfície da peça, diminuindo o desempenho do polimento. Essas tendências são mais óbvias além de uma rotação do fuso de 4000 rpm. Além disso, além de 4000 rpm, a ferramenta apresenta movimento oscilante, que pode ser causado por excentricidade no sistema. Assim, uma rotação de 2000 rpm foi escolhida como a condição ideal, cujo qual foi utilizado para os testes definitivos de pós-processamento por MAF (conforme será relatado na Seção 4.2).

Figura 55 – Observação da estabilidade da escova flexível magnética em diferentes rotações.



(A)=Invólucro de PLA para os ímãs, (B)=escova flexível, (C)=amostra, (1)=0 rpm, (2)=500 rpm, (3)=2000 rpm, (4)=4000 rpm, (5)=6000 rpm

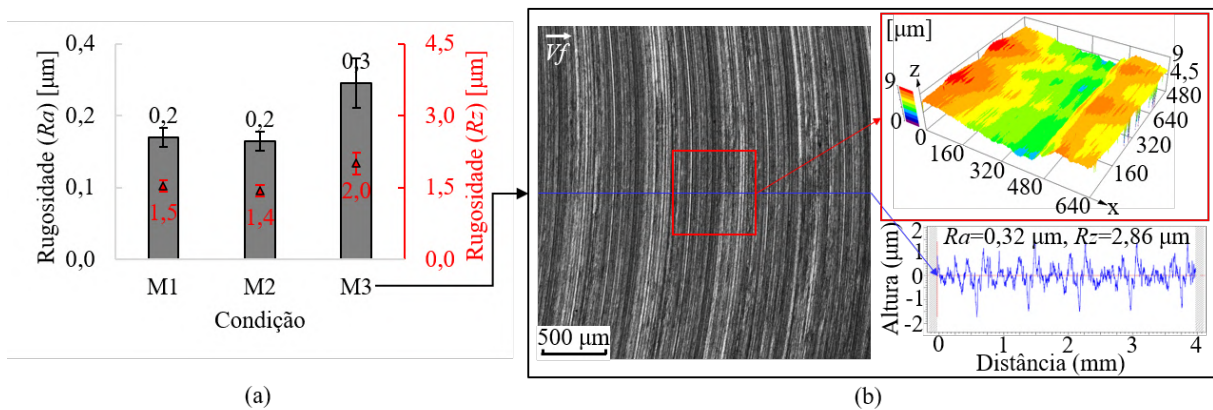
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência, os resultados da rota de fresamento nº 3 serão apresentados.

4.1.4 Rota de fresamento nº 3

No tocante aos experimentos de fresamento, cujos quais foram realizados para explorar a capacidade da operação de pós-processar peças de aço inoxidável 316L produzidas por DED (amostras da configuração B). Esse conjunto de testes foi denominado de rota de fresamento 3, descritos nos testes-piloto (Subseção 3.2). Na Figura 56 (a) é apresentado a rugosidade da superfície após os pós-processos de fresamento. Apesar do avanço ser diferente para as condições M1 e M2, as rugosidades resultantes foram estatisticamente semelhantes. Conforme esperado, a condição M3 (maior avanço) gerou amostras com maior rugosidade. Embora as peças fresadas tenham alcançado baixos valores de rugosidade ($0,2-0,3 \mu\text{m } R_a$ e $1,4-2 \mu\text{m } R_z$) nessas condições, as superfícies apresentam marcas periódicas da ferramenta, conforme pode ser observado na Figura 56 (b). Tais marcas são inerentes do processo.

Figura 56 – (a) Rugosidades das amostras planas após os testes de fresamento na rota de pós-processamento 3 e (b) topografia da superfície.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O processo de fresamento não é engajado (a fresa não remove material em alguns momentos), possuindo movimento em vazio de 38,8% ($46/120^\circ$) (ver Figura 37). Tal fato pode contribuir para a piora da qualidade superficial das amostras. No futuro, o engajamento da ferramenta pode ser solucionado adotando-se algumas medidas, tais como: substituição do corpo da fresa para uma com maior número de pastilhas de corte, diminuição do diâmetro da ferramenta e/ou aumento da largura do corpo de prova.

Comparando-se a profundidade de corte (a_p) dos processos de fresamento e retificação, o a_p utilizado para o fresamento foi de 0,4 mm, enquanto para retificação, foi em torno de 0,01 mm (conforme demonstrado pelos resultados discutidos na Subseção 4.1.1). Assim, de acordo com as condições utilizadas nesse estudo, fica evidente a maior capacidade de remoção de material do fresamento em centros de usinagem em relação à retificação.

Visto que as rotas 1 e 2 utilizaram um corpo de prova de fresa com dois insertos e com o objetivo de obter maior produtividade e menor tempo de processamento, a rota de fresamento 3 (com três insertos) foi escolhida como as condições ideais, cujas condições foram utilizadas nos testes definitivos de pós-processamento por fresamento (conforme será relatado na Seção 4.2). Além disso, as condições de usinagem escolhidas foram aquelas recomendadas pelo fabricante, visto que testes de desgaste e fim de vida foram realizados por este para otimizar a relação custo e produtividade. Como tais ensaios não foram realizados durante esse estudo optou-se por seguir os protocolos experimentais padronizados.

Por fim, pode-se ressaltar que os testes-piloto forneceram informações essenciais para explorar as capacidades de cada operação de pós-processamento, auxiliando na tomada de decisão da escolha de qual ferramenta e parâmetro a ser utilizado. Na sequência, os resultados dos testes definitivos são apresentados.

4.2 Resultados dos testes definitivos de pós-processamento

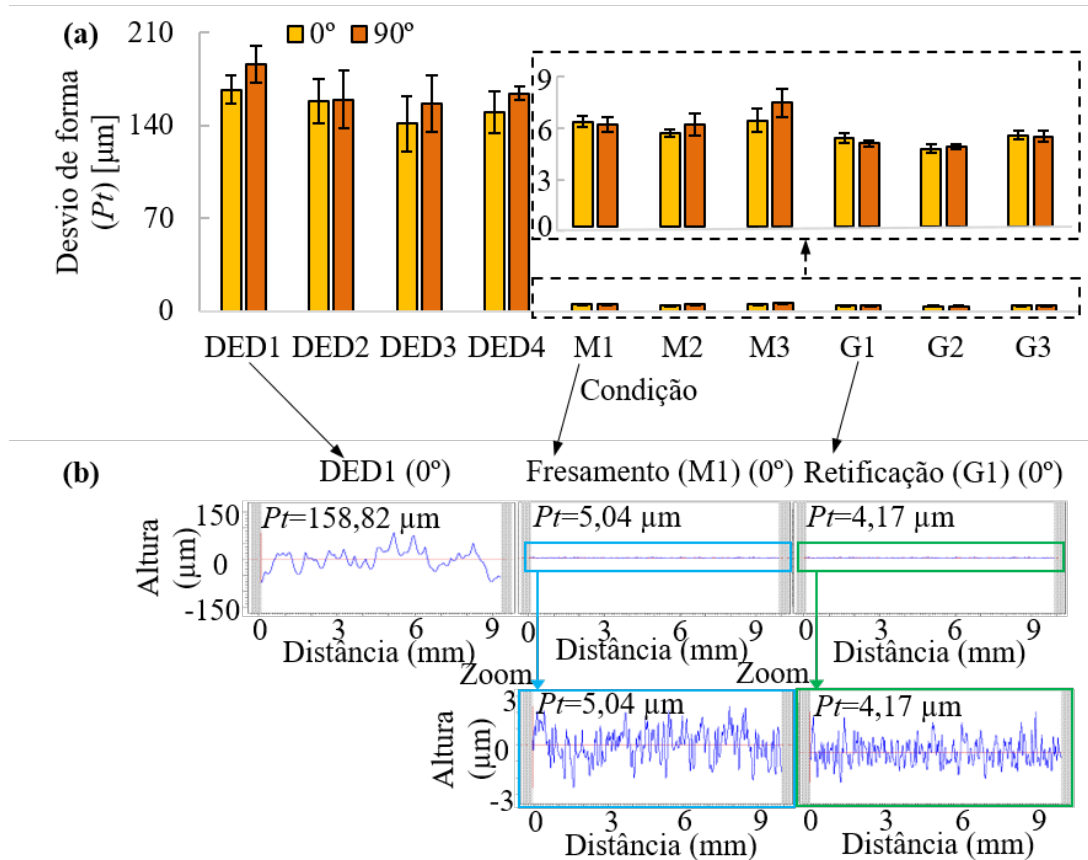
Inicialmente, será apresentado os efeitos das operações nas características superficiais das amostras (configuração B de deposição). Na sequência, algumas respostas de saída do processo serão discutidas, sendo elas taxa de remoção de material, tempo de processamento, forças de corte e energia específica.

4.2.1 Características superficiais

Na Figura 57 são apresentados os resultados do desvio geométrico (P_t) e na Tabela 26 é apresentada de forma sumarizada os resultados médios após cada processo. Conforme pode ser observado na Figura 57 (a), não há diferença significativa entre os valores de P_t medidos na direção paralela (0°) e perpendicular (90°) à direção de avanço da ferramenta ou cabeçote de deposição. Devido às características do processo AM (por exemplo, morfologia e geometria das camadas de deposição), foram encontrados erros de retitude entre 141 e 186 μm para as peças após DED. Os resultados sugerem que uma profundidade mínima para usinagem deve ser próxima de 0,2 mm para correção de erros geométricos e dimensionais. Após três passes de fresamento ($a_p=0,4$ mm), os desvios geométricos das peças após DED foram removidos e os valores de P_t foram próximos de 5 μm (30 vezes menor que aqueles alcançados após deposição). Sendo assim, o fresamento se mostrou ser eficiente na remoção de material e no aumento da qualidade superficial. Devido à interação dos grãos abrasivos do rebolo na superfície da peça, as superfícies retificadas apresentaram menores valores de retilineidade (≈ 4 μm) do que as superfícies fresadas, indicando melhor qualidade superficial em termos de tolerância dimensional. O desvio padrão dos valores de retilineidade para as superfícies retificadas é o menor (9%) entre os processos analisados, apresentando boa repetibilidade do processo.

Na Figura 57 (b), um exemplo dos perfis primários das superfícies após DED, fresamento

Figura 57 – (a) Desvio geométrico após cada processo e (b) perfil primário após DED1, fresamento (M1) e retificação (G1).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 26 – Valores médios de retitude das superfícies após cada processo em μm .

Processo	DED	Fresamento	Retificação
Média global	160,45	5,23	4,20
Desvio	$\pm 22,49$ (14%)	$\pm 0,67$ (13%)	$\pm 0,36$ (9%)

Fonte: Elaborada pelo autor.

e retificação são apresentados, no qual é possível observar qualitativa e quantitativamente a melhora da qualidade superficial após as operações de pós-processamento. Os valores de retitude para as peças após polimento não foram apresentadas, sendo que o MAF não alterou os valores de retitude advindos do pós-processo anterior (visto que o MAF é um processo de cópia sob pressão e não corrige erros geométricos e dimensionais).

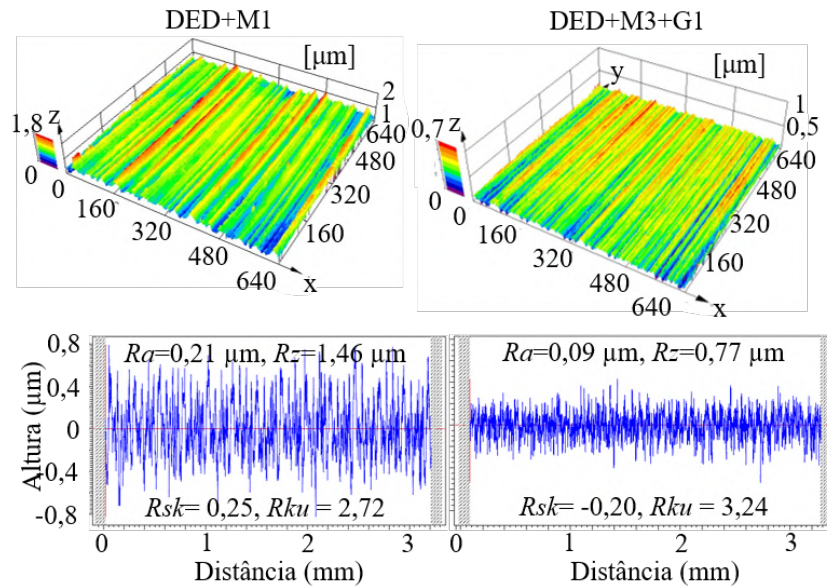
Comparativamente, [Riede et al. \(2019\)](#) reportaram erros de planicidade igual a 262 ± 27 (10%) μm em peças de 316L-Si fabricadas por DED. A diferença entre os valores reportados por [Riede et al. \(2019\)](#) e os apresentados nesse estudo pode estar associada aos parâmetros e condições de deposição. Todavia, os valores são considerados altos para certas aplicações biomédicas, nucleares, alimentícia, entre outras, ficando evidente a necessidade de pós-processamento

para melhorar a precisão dimensional.

Na Figura 58 são apresentadas as topografias superficiais após duas sequências de cadeia de processo: (a) DED + fresamento (M1) e (b) DED + fresamento (M3) + retificação (G1). O objetivo foi produzir peças com menores valores de rugosidade para o processo MAF em um tempo de usinagem menor. O perfil da superfície após a fresamento (M1) apresentava marcas periódicas resultantes da operação de fresamento ($f_z=0,08$ mm/dente; $a_p=0,4$ mm). O perfil após retificação (G1) também teve alguma periodicidade devido à característica aleatória das arestas de corte da ferramenta abrasiva e as condições utilizadas ($f=0,067$ mm/rot; $a_p=0,01$ mm). A superfície fresada apresentava maior valor de rugosidade do que a superfície retificada. Os valores iniciais de rugosidade ($15,15\pm 2,96$ μm R_a , $105,39\pm 12,39$ μm R_z após DED) foram reduzidos em 2,1 s para $0,21\pm 0,02$ μm R_a e $1,55\pm 0,14$ μm R_z após o fresamento (M1) e em 10,8 s para $0,13\pm 0,03$ μm R_a e $1,16\pm 0,26$ μm R_z após retificação (G1). Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015) e DebRoy *et al.* (2018), os altos valores de rugosidade das amostras após DED podem estar associados a vários fatores, como morfologia das camadas de deposição e aglomeração dos pós (fenômeno conhecido como pelotamento ou *balling*, no qual o material líquido não adere ao substrato adjacente devido à tensão superficial), presença de pós semifundidos aderidos à superfície, entre outros. Após o fresamento (DED+M1) e retificação (DED+M3+G1) como pós-processos, foi alcançada uma melhoria de 99% na rugosidade em aproximadamente 12 s de tempo de pós-processamento. Uma assimetria (*skewness*) positiva foi obtida para a superfície fresada ($M1=0,22\pm 0,19$ R_{sk}), enquanto uma assimetria negativa foi obtida para a superfície retificada ($G1=-0,44\pm 0,15$ R_{sk}). As superfícies fresadas (DED+M1) e retificadas (DED+M3+G1) foram polidas com MAF com diferentes velocidades de avanço do ímã: condições MAF(Vf200) e MAF(Vf1012), em 259 e 128 s, respectivamente. Os experimentos de polimento foram realizados até que a rugosidade da superfície atingisse cerca de $0,6$ μm R_z ($\approx 0,07$ μm R_a), que foi a rugosidade limite para as condições utilizadas neste estudo. Esses limites de rugosidade foram investigados após o polimento das amostras fresadas (DED+M2). Usando uma velocidade de avanço igual a 200 mm/min, foram realizados 90 passes de MAF (a cada 30 passes, a rugosidade foi medida). Após 30 passes (≈ 260 s de tempo de polimento), a rugosidade atingiu o limite.

Na Figura 59, as mudanças na rugosidade (R_z) e assimetria (*skewness*, R_{sk}) em função do tempo de polimento e número de passes são apresentada. Na Figura 60 é exibida as topografias superficiais após o acabamento com cada uma das quatro diferentes cadeias de processo: DED+M1+MAF(VF200), DED+M3+G1+MAF(VF200), DED+M1+MAF(VF1200) e DED+M3+G1+MAF(VF1200). De forma geral, todas as superfícies foram suavizadas a um nível de rugosidade semelhante, independentemente da cadeia do processo. No entanto, as mudanças na rugosidade e assimetria com o tempo foram diferentes para a cadeia de processo (a) DED+M1+MAF. Com o aumento da velocidade de avanço de 200 para 1012 mm/min, a escova flexível de partículas tendia a remover seletivamente o material dos picos das ondulações superficiais (ver Figura 60). Isso resultou na maior redução da rugosidade e assimetria. Em contraste, a velocidade de avanço do ímã mais rápida na cadeia de processo (b) DED+M3+G1+MAF (1012

Figura 58 – Condição inicial da superfície após fresamento (M1) e retificação (G1).

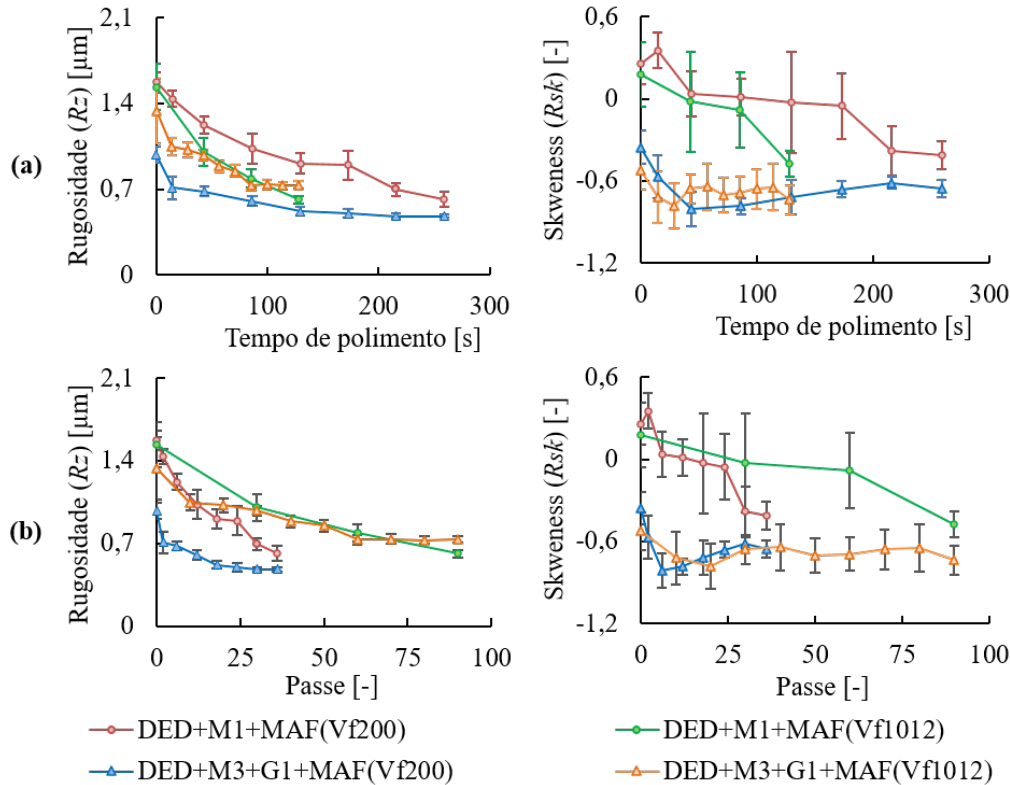


Fonte: Elaborada pelo autor.

versus 200 mm/min) não melhorou a rugosidade da superfície tanto quanto a outra cadeia de processo (DED+M1+MAF). Isto pode ter sido devido à criação de pites (pequenas crateras) na superfície, cujo resultado também foi reportado por Yamaguchi, Fergani e Wu (2017). A geração de pites é inevitável no MAF de alta velocidade. Este não é apenas um problema do MAF, mas um desafio comum de processos abrasivos soltos (não aglutinados por ligantes). Estudos adicionais para eliminar ou minimizar a geração de pites no polimento de alta velocidade são essenciais para ampliar as aplicações de peças produzidas por DED. A menor velocidade de avanço do ímã (DED+M1+G1+MAF(Vf200)) alterou completamente a superfície da superfície retificada (G1) para uma superfície polida (isenta de marcas de retificação). Isso pode ter ocorrido porque a superfície retificada nesta cadeia apresentava um menor valor de rugosidade inicial do que a peça utilizada no MAF(Vf1012).

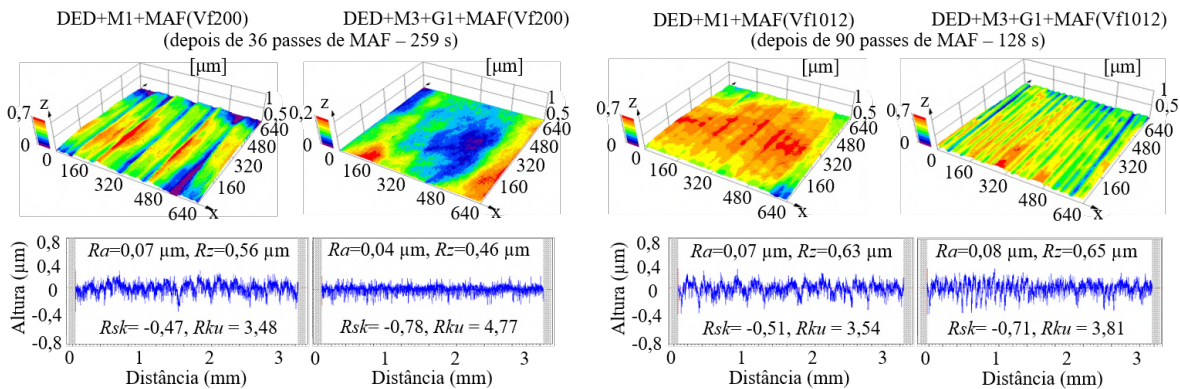
Na Figura 59 é possível realizar duas possíveis interpretações dos resultados: Figura 59 (a) com a perspectiva do tempo de polimento e Figura 59 (b) com o número de passes no eixo das abscissas. No tocante à Figura 59 (a), fica evidente que o aumento do avanço de deslocamento do ímã de 200 para 1012 mm/min produz uma superfície com níveis de rugosidade e assimetria semelhantes em menor tempo de processamento, sendo que o tempo despendido do MAF(Vf1012) foi aproximadamente a metade do MAF(Vf200). Dessa forma, ocorreu uma maior remoção de material e redução de rugosidade por tempo de processamento para o MAF(Vf1012) quando comparado ao MAF(Vf200). Nesse ponto de vista, o aumento do avanço do polimento pode ser uma alternativa viável para pós-processar superfícies produzidas por MA com menos tempo (e, conseqüentemente, custo) envolvidos na cadeia produtiva. Em relação à Figura 59 (b), essa interpretação é oposta: o menor avanço alcançou o limite de rugosidade após menor

Figura 59 – Impacto do avanço do ímã e número de passes durante o MAF na superfície (R_z e R_{sk}) das amostras M1 e G1: perspectiva do tempo de polimento (a) e passes (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 – Impacto do avanço do ímã e número de passes durante o MAF na topografia da superfície das amostras M1 e G1.



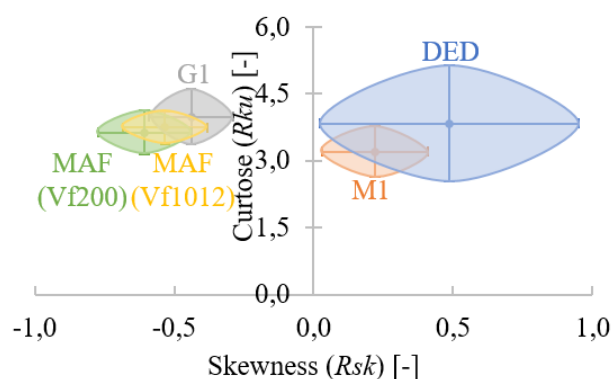
Fonte: Elaborada pelo autor.

número de passes de polimento quando comparado ao maior avanço. Visto que após 30 passes, a superfície polida com MAF(Vf200) apresentou $0,08 \mu\text{m}$ R_a , $0,70 \mu\text{m}$ R_z e $-0,38 R_{sk}$. Já a amostra após MAF(Vf1012) apresentou $0,13 \mu\text{m}$ R_a , $1,01 \mu\text{m}$ R_z e $-0,02 R_{sk}$. Dessa forma, ocorreu uma maior remoção de material e redução de rugosidade por passe de polimento para o MAF(Vf200) quando comparado ao MAF(Vf1012). Todavia, ambas análises são válidas e

podem ser utilizadas e apresentadas a depender do objetivo da pesquisa. Nesse estudo, o foco foi diminuir o tempo global de pós-processamento de peças metálicas produzidas por DED.

Na Figura 61, um mapa topológico dos valores R_{sk} - R_{ku} é apresentado. Em relação aos parâmetros de curtose (R_{ku}), os valores médios de R_{ku} alcançados mostraram a distribuição de altura com presença de picos ($R_{ku} > 3$). Embora a topografia e rugosidade (R_a , R_z) das amostras após a deposição e pós-processadas com diferentes operações sejam totalmente diferentes, a morfologia de todas as superfícies, em termos de distribuição dos picos e vales, é semelhante. A análise apenas do parâmetro R_{ku} pode levar a interpretações errôneas das características topográficas da superfície. Portanto, a análise combinada de vários parâmetros (podendo ser R_a , R_z , R_{sk} e R_{ku}) ajuda a interpretar adequadamente o perfil da superfície. Em relação ao parâmetro de assimetria (*skewness* - R_{sk}), enquanto as amostras DED e fresadas apresentaram valores de R_{sk} positivos, as superfícies retificadas e polidas apresentaram valores de R_{sk} negativos. Um grau positivo de simetria da distribuição de altura de picos e vales indica perfis com picos altos ou vales preenchidos, enquanto graus negativos indicam perfis com picos removidos ou arranhões profundos (GADELMAWLA *et al.*, 2002). Assim, uma assimetria positiva ($R_{sk} > 0$) para as amostras DED e fresadas pode ser associada à presença de partículas de pó parcialmente fundidas aderidas à superfície e as marcas de avanço geradas pela ferramenta de corte durante a usinagem, respectivamente. A assimetria negativa ($R_{sk} < 0$) para as amostras retificadas e polidas indica que as superfícies tiveram seus picos suavizados devido à interação dos grãos abrasivos na superfície da peça, indicando melhor qualidade superficial. Portanto, a forma da superfície deixada pelo DED pode ser alterada através da aplicação de pós-processos. A alta dispersão dos dados das amostras DED foi associada à variabilidade do processo de deposição.

Figura 61 – Mapa topológico R_{sk} - R_{ku} de cada respectivo processo.

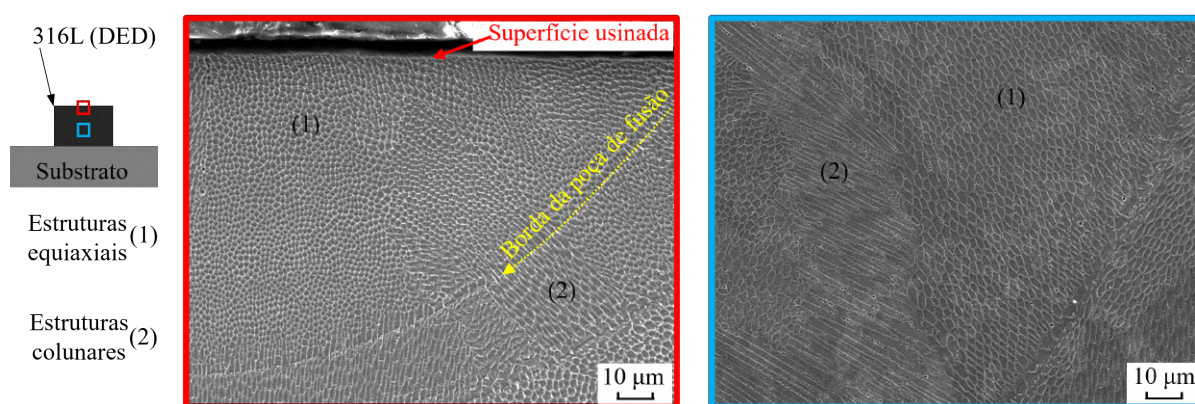


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 62 é exibida a microestrutura próxima da superfície e no centro da peça após o polimento. Estruturas colunares e equiaxiais (celulares) estão presentes na amostra, sendo essas microestruturas comumente observadas nas peças produzidas por DED devido às altas taxas de resfriamento (de 10^3 a 10^5) Ks^{-1} (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; ZHENG *et*

al., 2008). Tais componentes microestruturais são semelhantes aos relatados por [Ma, Wang e Zeng \(2017\)](#), [Saboori et al. \(2020\)](#) e [Guo et al. \(2021\)](#). Não foram observadas diferenças entre as superfícies DED+M1+MAF e DED+M3+G1+MAF. Além disso, como apresentado na Figura 62, não foram detectadas mudanças visíveis entre estruturas próximas à superfície e centro das peças. Isso confirma que o MAF é capaz de suavizar as peças produzidas por DED sem alterações observáveis em suas microestruturas. Além disso, nenhuma mudança microestrutural significativa foi encontrada (por exemplo, formação de camada branca, queima ou rachaduras) perto das superfícies fresadas/retificadas. Portanto, não foram observadas alterações microestruturais próximas à superfície em função do processo.

Figura 62 – Microestruturas da seção transversal DED+M1+MAF(Vf200).

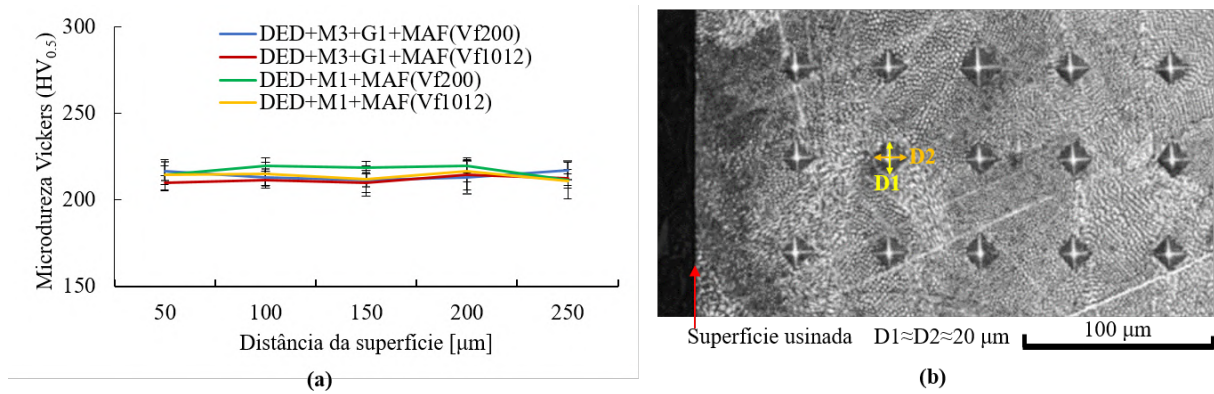


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 63 (a) é apresentado o perfil de dureza das quatro cadeias de processo estudadas e na Figura 63 (b) é exibida uma imagem das indentações na peça DED+M3+G1+MAF(Vf200). A dureza obtida para todas as condições permaneceu estatisticamente semelhante ao longo do perfil de subsuperfície analisado – de 50 a 250 μm , apresentando uma média de 214 ± 6 HV. Tais valores são similares àqueles reportados por [Yu, Rombouts e Maes \(2013\)](#). Assim, pode-se concluir que para as condições testadas a dureza na região subsuperficial também não foi afetada pelos processos de fresamento, retificação e MAF.

Na Figura 64 é apresentada a tensão residual (TR) das superfícies após DED, fresamento, retificação e MAF. A amostra após DED apresenta TR compressiva, que está associada ao gradiente de temperatura da poça de fusão (ΔT ao redor do feixe de laser reduz a resistência do material e promove a expansão da camada, induzindo tensão residual compressiva na camada superficial superior) ([MERCCELIS; KRUTH, 2006](#)). Tal estado de tensão de compressão inicial de componentes de aço inoxidável 316L fabricados por DED também é relatado por [Piscopo, Salmi e Atzeni \(2021\)](#) e [Kumaran et al. \(2021\)](#). Este estado de compressão está associado a parâmetros de deposição (potência do laser, velocidade de deslocamento do cabeçote de deposição, sobreposição de camadas, entre outros). A análise futura do perfil de profundidade de TR pode indicar como o gradiente de temperatura afeta as curvas de distribuição de tensão ao longo do interior da peça. A TR na camada externa deixada pelo DED pode ser alterada através da aplicação de

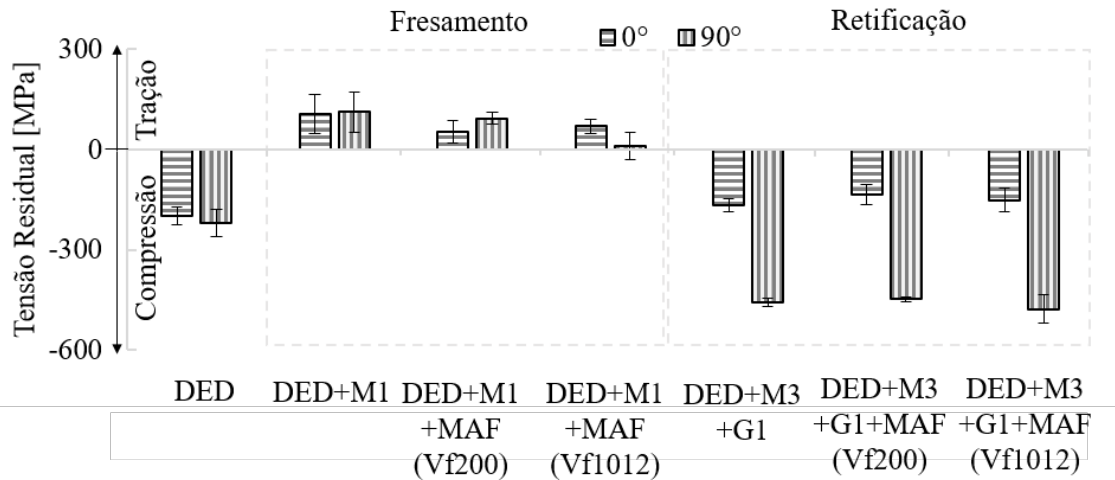
Figura 63 – (a) Perfil de dureza Vickers para diferentes cadeias de pós-processamento e (b) marcas de indentações.



Fonte: Elaborada pelo autor.

pós-processos. Enquanto as amostras fresaram apresentaram TRs de tração, as superfícies retificadas apresentaram TRs compressivas. Os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e seus efeitos (por exemplo, forças de corte e temperaturas) também são responsáveis por essa diferença na TR das superfícies fresadas e retificadas. Comparativamente, o a_p utilizado para fresamento foi de 0,4 mm, enquanto para retificação esse parâmetro foi 0,01 mm, o que pode levar a uma maior geração de calor para superfícies fresadas em comparação com amostras retificadas. O fresamento induziu TR de tração na camada superficial superior devido à deformação plástica, gradientes térmicos e alterações metalúrgicas na estrutura subsuperficial (zonas de deformação primária e secundária durante a formação de cavacos) (EL-KHABEERY; FATTOUH, 1989). Por outro lado, a retificação introduziu TR compressivas na camada superficial superior devido à deformação plástica não homogênea causada pela interação mecânica de grãos abrasivos, deformação termoplástica e transformação de fase (DING *et al.*, 2017), sendo os dois primeiros os principais fatores (ZHANG *et al.*, 1992). A TR compressiva das amostras retificadas também é um indicador da eficiência do fluido de corte, pois altas temperaturas podem gerar TRs de tração. Assim, alterar o estado de tensão de tração das amostras fresadas para TR compressiva após a retificação afeta positivamente as propriedades mecânicas, como resistência à fratura, resistência à corrosão, vida à fadiga, entre outras. O processo MAF não altera significativamente a TR. A força magnética (relacionada às forças de corte) que atua sobre as partículas de ferro não é suficiente para alterar a estrutura da subsuperfície (em termos de TR). Para tanto, as partículas de ferro devem ser substituídas por esferas magnéticas, como demonstrado por Yamaguchi, Fergani e Wu (2017). Não há diferença significativa entre os valores de TR medidos com as amostras posicionadas em 0° e 90°, indicando não direcionalidade dos resultados. Esta afirmação não é válida para amostras retificadas (visto que a TR na direção transversal, 0°, é diferente daquelas obtidas na direção de retificação, 90°), que podem estar associadas às distribuições de deformações plásticas em diferentes direções sobre a superfície retificada (*plowing*), ações de deslizamento (*sliding*) e os efeitos da deformação da peça e níveis de contração em diferentes direções (paralela e perpendicular ao rebolo) (BALART *et al.*, 2004).

Figura 64 – Tensões residuais das amostras após DED, fresamento, retificação e polimento



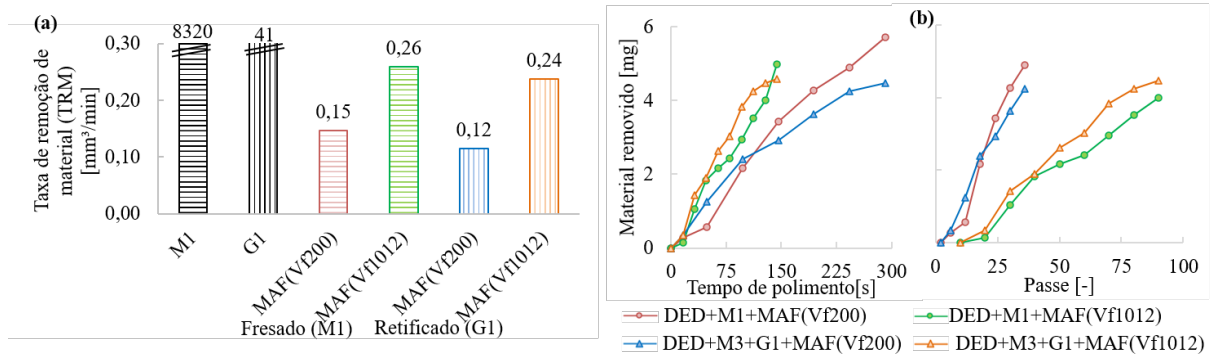
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.2 Taxa de remoção de material, tempo de processamento, forças de corte e energia específica

Na Figura 65 (a) é apresentada a taxa de remoção de material (TRM) de cada pós-processo. O fresamento apresentou a maior capacidade de remoção de material (conforme mencionado nos testes-piloto - Subseção 4.1), sendo até 200 vezes maior que a retificação. Esse comportamento é explicado pela alta remoção de material em um curto tempo de processamento em comparação com os outros pós-processos. Após o MAF, foi medida uma quantidade de material removido (Figura 65 (b) - com a perspectiva do tempo de polimento e o número de passes) entre 4,5-5,7 mg (para todas as condições de polimento), que se estima corresponder à remoção de 2,3-3,5 μm de espessura. Além disso, as amostras retificadas apresentaram menor remoção de material durante o polimento quando comparadas às fresadas. As diferentes topografias superficiais (em termos de distribuição de picos e vales) geradas pelo fresamento e retificação afetam como as cadeias de partículas flexíveis manipulam o abrasivo contra a superfície da peça para remover o material durante o polimento. Superfícies fresadas (com maiores picos) apresentaram maior remoção de material durante o MAF do que superfícies retificadas (com menores picos ou vales profundos). Assim, o processo MAF é mais eficiente para o polimento de superfícies rugosas, o que pode estar associado ao comportamento dos grãos abrasivos nas áreas de contato com a superfície da peça (facilidade de remoção dos maiores picos e dificuldade de acesso ao fundo dos vales mais profundos). Dentre o fresamento, retificação e MAF, o último teve as menores TRMs, devido à natureza do processo de polimento. No entanto, o polimento é fundamental para aumentar a qualidade superficial das peças. Uma redução do tempo de polimento pelo aumento da velocidade de avanço do ímã afeta diretamente a TRM. A maior TRM é obtida em condições com maior avanço, com vantagem para a cadeia de processo DED+M1+MAF(Vf1012). Em relação a essa sequência de processo, o tempo ativo

de processamento para a fabricação de peças com o processo de DED foi de 691,2 s, enquanto para M1 (3 passes), o t_c foi de 2,1 s, e MAF(VF1012), 90 passes, necessitou de 128,1 s. Portanto, toda a sequência de processamento levou 821,4 s (aproximadamente 13,7 min), no qual o tempo despendido para o pós-processamento foi de apenas 130,2 s ($\approx 2,2$ min, equivalente a 16%). A cadeia de processo DED+M3+G1+MAF(Vf1012) levou 9,5 s a mais.

Figura 65 – (a) Taxa de remoção de material de cada respectivo processo e (b) evolução de remoção de material das amostras em diferentes condições de polimento.



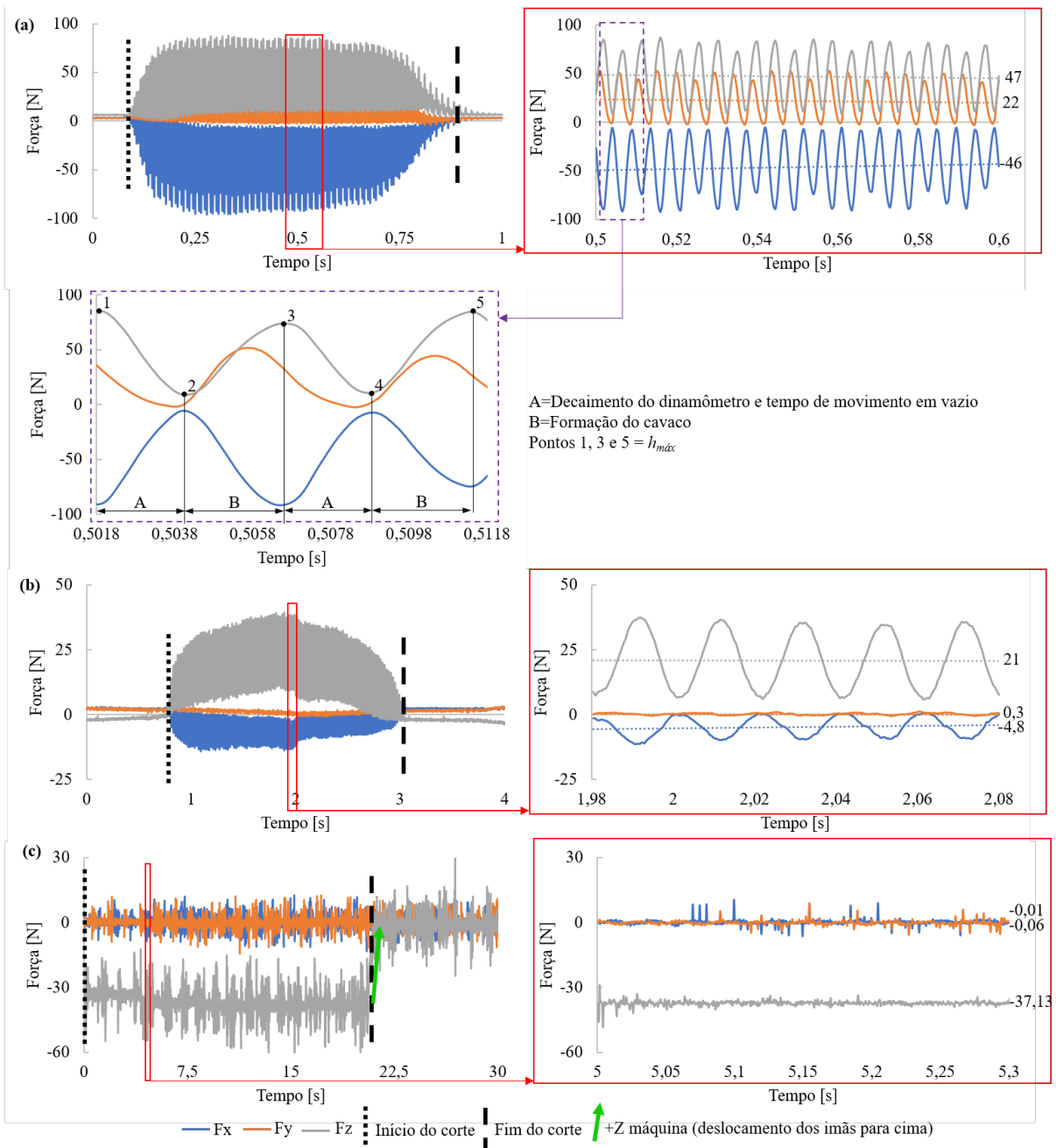
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 66 é apresentado graficamente os resultados da força de usinagem para três condições distintas de pós-processamento, no qual são exibidos os comportamentos das componentes nas direções X, Y e Z do dinamômetro, corresponde à força radial ($F_x=F_r$), de avanço (tangencial, $F_y=F_f$) e de apoio (axial, $F_z=F_d$), respectivamente.

Na Figura 66 (a), o gráfico de forças relacionado ao fresamento (M1) é apresentado, no qual foi feita uma análise de 0,1 s de fresamento (tracejado contínuo em vermelho) com rotação do eixo-árvore em 4218 rpm (70,3 rps), correspondendo à aproximadamente 7 rotações da ferramenta. Sendo o número de arestas de corte igual a três, a frequência do sinal de corte equivale a 210,9 Hz. Assim, conforme esperado, foram observados 21 picos de força, confirmando a precisão da máquina para o ajuste da rotação do fuso. Além disso, uma análise das componentes da força de usinagem foi realizada no intervalo de 0,01 s (tracejado descontínuo em roxo). O ponto 1 indica quando o primeiro inserto da fresa sai da zona de corte (sem remoção de material, portanto tem-se o tempo de movimento em vazio²) e inicia um decaimento com duração próxima de 2 milissegundos para a recuperação do descarregamento do dinamômetro piezoelétrico. Após esse determinado tempo, o segundo inserto da fresa inicia o corte no ponto 2 (com o início da remoção de material), no qual ocorre o incremento progressivo das forças e da espessura de corte para formação do cavaco, atingindo o ponto máximo (tanto em termos de força quanto em espessura de corte, denominado de h_{max}) – ponto 3. Ao chegar no ponto 3, o h_{max} foi atingido e

² Dessa forma, corrobora-se a afirmação que o processo de fresamento não é engajado (a fresa não remove material em alguns momentos). Com um movimento em vazio de 38,8% (46/120°), o tempo teórico é de 1,7 milésimos de segundo. Tais valores são próximos, mas a diferença teórica e empírica pode ser associada à taxa de frequência de aquisição de sinal utilizada (2 kHz) e ruídos presentes no sinal gráfico.

Figura 66 – Forças de usinagem (a) fresamento (M1), (b) retificação (G3) e MAF(Vf200) (peça fresada).



Fonte: Elaborada pelo autor.

o inserto sai da zona de corte, indicando um decaimento das forças até o ponto 4. A partir deste ponto, o ciclo se repete. A F_c média para esse teste foi de 51 N e a F_a foi de 47 N.

Na Figura 66 (b), o gráfico de forças relacionado à retificação (G3) é apresentado, no qual também foi feita uma análise de 0,1 s de retificação (tracejado contínuo em vermelho) com rotação do eixo-árvore em 3000 rpm (50 rps), correspondendo à aproximadamente 5 rotações da ferramenta. Cinco picos de força foram observados nesse intervalo. A análise senoidal das componentes da força de usinagem é similar à descrita para o fresamento, com a formação do cavaco gerado pelos grãos abrasivos. Devido ao avanço ($V_f=600$ mm/min, $f=0,2$ mm/rot), o

tempo de decaimento das forças para a recuperação do descarregamento do dinamômetro é próximo de 10 ms, aproximadamente 5 vezes maior que o M1. Devido à natureza randômica dos grãos abrasivos na superfície do rebolo, não é possível afirmar se existem momentos em que não ocorre remoção de material (movimento em vazio dos grãos). A F_c média para esse teste foi de 5 N e a F_a foi de 21 N. De forma comparativa, o F_c é próximo de 10 vezes menor que os valores alcançado na condição M1 e F_a próximo de 2 vezes, indicando menores esforços para a retificação quando comparado ao fresamento. Tal fato está associado principalmente à diferença na profundidade de corte utilizado nos processos, sendo o a_p da retificação 40 vezes menor que o utilizado no fresamento.

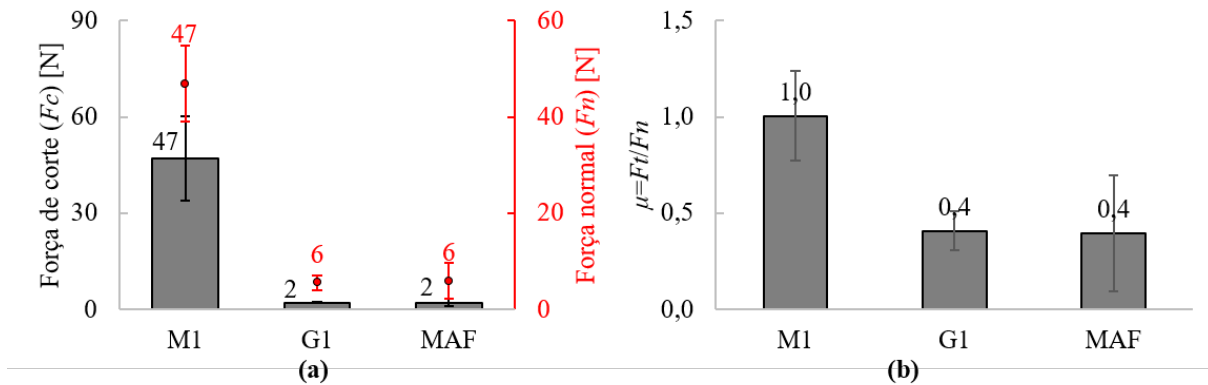
Na Figura 66 (c), o gráfico de forças relacionado aos dois primeiros passes de polimento (MAF(Vf200) da peça fresada (M1)) é apresentado, no qual também foi feita uma análise de 0,3 s de retificação (tracejado contínuo em vermelho) com rotação do eixo-árvore em 2000 rpm. Picos de força (aumento progressivo das forças e espessura de corte até o ponto máximo) não foram observados nesse intervalo. Percebe-se que as forças na direção X e Y são próximas de zero, devido aos baixos valores da força de polimento (a F_c média para esse teste foi de próxima de 0,1 N). O campo magnético (e a força magnética) na direção -Z da máquina é negativa (carga negativa do polo para baixo), visto que o campo magnético tem orientação positiva ao +Z da máquina (carga positiva do polo para cima). Assim, o corpo de prova sofre repulsão dos polos, sendo “empurrado” para baixo durante o polimento (F_a foi de -37 N). Dessa forma, quando o ciclo de corte é finalizado e os imãs são deslocados +Z na máquina, a força na direção Z retorna à valores próximos de zero. A presença da escova flexível diminui o campo magnético, fazendo com que ocorra menor atração do corpo de prova para os polos. Para uma análise mais precisa das componentes da força de usinagem durante o processo de polimento é necessário a utilização de um microdinamômetro específico em termos de sensibilidade, rigidez, frequência natural e resolução. Todavia, vale ressaltar que a aquisição de um equipamento com essas especificações pode ter um custo bastante elevado³.

Na Figura 67 (a), as componentes das forças de corte e normal são exibidas para M1, G1 e MAF (média das quatro condições). Observa-se que a média de F_c e F_n foi 47 N para o fresamento. Maior volume de material foi removido nesse processo, resultando em maiores esforços para formação do cavaco. Os valores médios de F_c e F_n foram iguais para ambos os processos de abrasivos, valendo 2 e 6 N, respectivamente. Tal fato é justificado pela menor remoção de material quando comparado ao fresamento. A relação entre força tangencial e normal (μ) é indicada na Figura 67 (b). Como os valores médios das forças tangencial e normal foram semelhantes para o fresamento, a relação (μ) entre as componentes de força foi próxima de 1. Como os níveis de força medidos para a retificação e polimento foram semelhantes, o valor de μ também foi similar para ambos os processos. A menor relação entre as forças tangencial e

³ Apenas para se ter um exemplo, o equipamento MicroDyn, marca Kistler, modelo 9109AA, atende tais requisitos e seu custo é próximo de USD 75 mil. Com o dólar cotado em R\$ 5,50 e os impostos de importação, quase meio milhão de reais serão necessários para a compra.

normal durante a retificação e polimento vem da forma como os grãos abrasivos interagem na amostra, atritando na superfície da peça sob uma força normal maior que a força tangencial. Além disso, a baixa relação de força nos processos abrasivos resulta na melhora da integridade superficial - em termos de rugosidade (ver Figura 59) e tensões residuais compressivas (no caso da retificação - ver Figura 64).

Figura 67 – (a) Forças de corte e normal e (b) relação entre essas componentes para as três operações de pós-processamento.

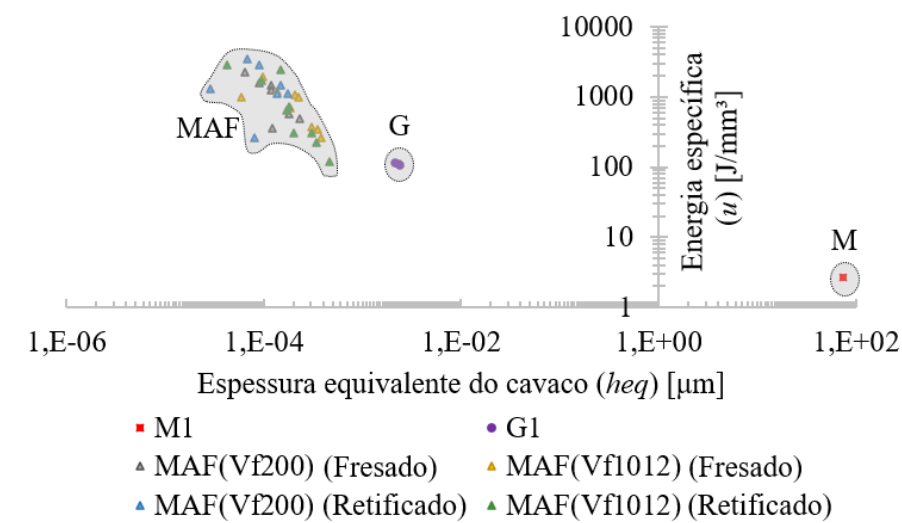


Fonte: Elaborada pelo autor.

O modo como as forças agem na superfície está ligado com a formação do cavaco (podendo ser quantificada pela espessura equivalente do cavaco, h_{eq}) e afeta diretamente a energia específica (u) do processo. Na Figura 68 são apresentadas as regiões de cada pós-processo no diagrama $h_{eq}-u$, indicando a faixa de espessura de cavaco equivalente (h_{eq}) e a energia específica (u) para cada pós-processo. O valor h_{eq} para o fresamento foi calculado de acordo com a Equação 3.5 e os valores h_{eq} para retificação e polimento de acordo com a Equação 3.8. Os valores h_{eq} calculados para o fresamento, retificação e MAF foram $74,3 \mu\text{m}$, 2 nm e $0,04-0,46 \text{ nm}$, respectivamente. u foi reduzido à medida que a espessura do cavaco foi aumentada. Isso se deve às forças de corte (potência de usinagem) e profundidade de corte envolvidas em cada processo. Quanto menores forem esses parâmetros, menores serão os valores h_{eq} , resultando no “efeito de escala”. Em que, menores são os valores de energia gasta para cortar e maiores são as energias relacionadas ao riscamento (*plowing*, u_{pl}) e deslizamento (*sliding*, u_{sl}). Por outro lado, u aumentou à medida que a rugosidade foi reduzida. Em relação à energia específica dos processos, o fresamento (M1) resultou em menores valores de u (cada passe consumiu $3 \pm 0,8 \text{ J/mm}^3$) para atingir $1,55 \pm 0,14 \mu\text{m } R_z$ ($0,21 \pm 0,02 \mu\text{m } R_a$). Devido à ação cortante dos grãos abrasivos, cada passe de retificação (G1) consumiu $110 \pm 2,8 \text{ J/mm}^3$ - cerca de 42 vezes mais energia em relação ao fresamento - chegando a $1,16 \pm 0,26 \mu\text{m } R_z$ ($0,13 \pm 0,03 \mu\text{m } R_a$). O principal objetivo do processo de retificação foi modificar as características da superfície, visando aumentar a qualidade superficial. Assim, o processo não removeu muito material e, conseqüentemente, as taxas de remoção de material implementadas neste estudo (discutidas na Figura 65 (a)) são menores do que as taxas típicas usadas na retificação. Da mesma forma, os

valores de h_{eq} também são significativamente menores. O MAF é de baixa eficiência energética devido à menor remoção de material em comparação com outros pós-processos e as ações de riscamento-deslizamento ($u_{pl}-u_{sl}$). Assumindo que a energia específica de corte (u_c) é constante de $13,8 \text{ J/mm}^3$ para aços (MALKIN; GUO, 2008), a razão de u_c necessária para a remoção de cavacos para u por passe é de $2 \pm 2\%$ para MAF (este valor está de acordo com a literatura (HASHIMOTO *et al.*, 2016)). Assim, 98% da energia é consumida para ações relacionadas ao u_{sl} e u_{pl} , neste caso do acabamento do aço inoxidável 316L produzido por DED. Comparativamente, a proporção é de 13% para retificação. Embora alto u tenha sido gasto durante o polimento ($1398 \pm 933 \text{ J/mm}^3$ para MAF(Vf200) e $955 \pm 798 \text{ J/mm}^3$ para MAF(Vf1012)) e alta relação u_{sl} , as marcas de fresamento/retificação foram suavizadas e a qualidade da superfície foi melhorada ($0,55 \pm 0,09 \mu\text{m } R_z$ e $0,06 \pm 0,01 \mu\text{m } R_a$ para MAF(Vf200) e $0,67 \pm 0,09 \mu\text{m } R_z$ e $0,08 \pm 0,01 \mu\text{m } R_a$ para MAF(Vf1012)). O u para MAF apresentou uma alta dispersão de dados devido aos baixos valores de remoção de material por passe e à sensibilidade da medição de material removido.

Figura 68 – Energia específica versus espessura equivalente do cavaco para as três operações de pós-processamento.

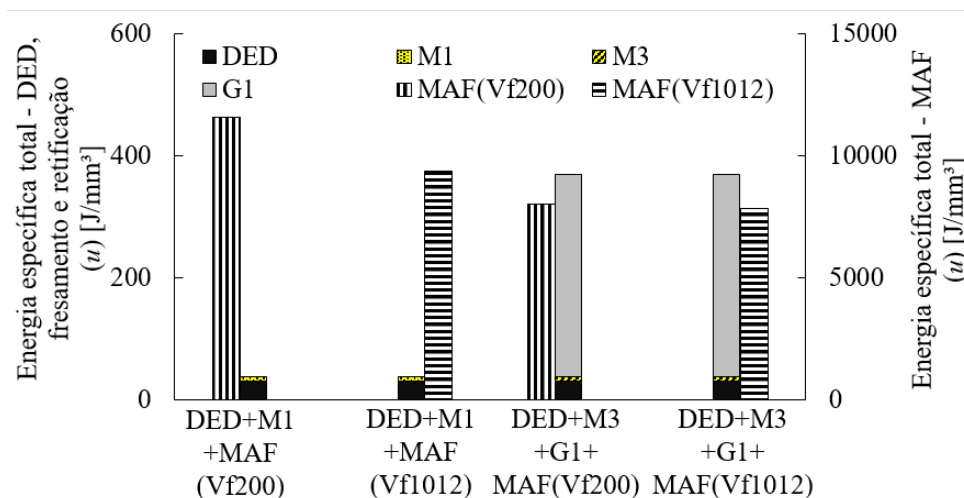


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 69 é apresentada a energia específica total de cada processo (calculada usando as Equações 3.3 e 3.4). Em relação ao fresamento e retificação, o total é a soma de três passes. Para MAF, é a soma de 36 passes com avanço de 200 mm/min e 90 passes com avanço de 1012 mm/min. Nota-se que o caso com retificação com avanço lento (DED+M3+G1+MAF(Vf200)) suavizou a superfície em menor tempo de polimento (129 s) - 50% do tempo no caso sem retificação (DED+M1+MAF(Vf200)). A u total para as cadeias de processo DED+M1+MAF(Vf200), DED+M1+MAF(Vf1012), DED+M3+G1+MAF(Vf200) e DED+M3+G1+MAF(Vf1012) foram 11611 , 9390 , 8373 e 8199 J/mm^3 , respectivamente. Assim, a seleção de diferentes cadeias de processo impacta não apenas as características da superfície obtida, mas também a energia específica global. Pode-se observar que o MAF tem um impacto significativo na energia específica

para todas as cadeias de processo (95,5-99,7%), e uma redução do tempo de polimento (com o aumento da velocidade de avanço do ímã) tem um impacto direto na energia específica global. Devido ao alto nível de energia específica no polimento, o impacto da adição da retificação na energia específica global ainda foi pequeno (330 J/mm^3 , correspondendo a aproximadamente 4% do total). No entanto, a adição de retificação à cadeia de processo reduziu a energia específica geral necessária para produzir superfícies espelhadas; em vez disso, a energia foi gasta durante as etapas adicionais de retificação.

Figura 69 – Energia específica total de cada respectiva cadeia de processo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De modo geral, as operações de pós-processamento modificaram as características superficiais das amostras de aço inoxidável 316L produzidas por DED. No qual ocorreu aumento da qualidade da superfície em termos de desvio geométrico e rugosidades, sem alterações observáveis da microestrutura e dureza. Além disso, o estado de tensão residual pode ser alterado de tração para compressão com a aplicação da retificação. Cada operação de pós-processamento possui uma capacidade de remoção de remoção, gerando forças de corte distintas que impactam na energia específica de corte.

A seguir, são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

CONCLUSÕES

Essa seção foi dividida em tópicos: no primeiro - as conclusões delineadas deste trabalho serão apresentadas; no segundo - algumas propostas para trabalhos futuros serão indicadas.

5.1 Conclusões

Esta tese teve como objetivo geral de investigar a viabilidade da adoção dos processos abrasivos de retificação e MAF para o pós-processamento de peças metálicas produzidas por DED. Este objetivo foi então subdividido em objetivos específicos e suas conclusões serão apresentadas a seguir.

- Os processos abrasivos de retificação e MAF foram adotados com êxito em centros de usinagem verticais, podendo ser utilizados na mesma máquina para o pós-processamento do aço inoxidável 316L produzido por DED. Para tanto, escolha correta do rebolo, sistemas de dressagem, refrigeração e fixação adequados são fundamentais para a retificação apresentar resultados satisfatórios. Para o MAF, características como ocampo e forças magnéticas, geometria do polo magnético, rotação do fuso e distância entre o imã/polo e a peça são requisitos técnicos que modificam a escova flexível e interferem diretamente no modo como as partículas magnéticas interagem na superfície da amostra, afetando a capacidade de polimento. Dessa forma, tais atributos devem ser selecionados a depender das condições de remoção de material e geometria da superfície (precisão da forma, rugosidade e textura da superfície) determinada no projeto do componente produzido.
- Devido à geometria das ferramentas, distribuição dos grãos pelo processo de eletrodeposição, tamanho dos grãos e incapacidade de dressagem por dressadores de ponta única, os rebolos de superabrasivos eletrodepositados usados na retificação tangencial (lateral) proporcionaram os piores valores de rugosidade, dentre as condições testadas. Retificação de topo (vertical) com rebolos tipo copo (solução encontrada facilmente no inventário dos

fabricantes) é uma alternativa viável para utilização em centros de usinagem (3-5 eixos), que podem ser utilizadas como soluções tecnológicas em uma cadeia de processo para pós-processamento de peças metálicas produzidas por DED. No entanto, para pós-processar peças com geometrias complexas os rebolos tipo copo podem não ser uma alternativa viável. Nesse caso, pode ser utilizado outros tipos de reboło, como a geometria *ball nose*.

- Rebolos convencionais permitem a utilização de dressadores estáticos de ponta única, tipo *fliesen* ou conglomerado (com facilidade de ser instaladas em centros de usinagem), gerando peças produzidas por DED com níveis micrométricos de rugosidade. A utilização de rebolos superabrasivos em comparação com rebolos convencionais pode ser uma solução para aumentar a taxa de remoção de material, com detrimento da qualidade superficial. No entanto, instalação de sistemas eficientes de dressagem (laser, contato e dressadores rotativos) devem ser adotados para alteração da agressividade do reboło e, conseqüente, aumentar a qualidade superficial da peça. Todavia, para cada uma dessas opções, a instalação de sistemas periféricos e auxiliares na máquina é necessária, demandando recursos tecnológicos e econômicos.
- O fresamento apresentou maior capacidade de remoção de material quando comparados aos processos abrasivos. Todavia, as peças processadas por retificação e MAF apresentaram melhor qualidade superficial. Dessa forma, pode-se obter uma cadeia de processamento em menor tempo de processamento e com a rugosidade em níveis submicrométricos por meio da combinação efetiva dos processos.
- A qualidade superficial (em termos de rugosidade, topografia e textura) pode ser alterada através da aplicação de pós-processos, a qual interfere diretamente no desempenho funcional da peça. O processo de DED produziu superfícies rugosas e irregulares. O fresamento reduziu a rugosidade, apresentado marcas periódicas resultantes da operação de fresamento ($f_z=0,08$ mm/dente; $a_p=0,4$ mm) causadas pela aresta de corte na superfície. A retificação aumentou a qualidade superficial, deixando marcas causadas pela interação dos grãos abrasivos do reboło na peça, com alguma periodicidade devido à característica aleatória das arestas de corte da ferramenta abrasiva e as condições utilizadas ($f=0,067$ mm/rot; $a_p=0,01$ mm). Após o polimento, todos os picos superficiais e marcas deixadas pelo fresamento e retificação foram suavizados, visto que a topografia das superfícies retificadas (com menores picos ou vales profundos) dificultam a remoção de material durante o MAF. Novas marcas/texturas superficiais foram geradas pelos grãos abrasivos usados no MAF.
- A cadeia de pós-processamento com fresamento, retificação, seguida de MAF é capaz de corrigir erros de forma e aumentar qualidade superficial das peças produzidas por DED sem alterações observáveis em sua microestrutura e dureza próximas à (sub)superfície.

- A tensão residual pode ser alterada através da aplicação de pós-processos devido à deformação plástica e gradiente de temperatura durante a formação do cavaco. Nas condições utilizadas, o fresamento induziu tensões residuais de tração, enquanto a retificação introduziu tensões residuais compressivas na camada superficial superior. O MAF não alterou significativamente o estado de tensão, pois a força magnética que agiu sobre as partículas de ferro não foi suficiente para alterar a estrutura da subsuperfície (em termos de tensão residual).
- Apesar da retificação ter consumido aproximadamente 42 vezes mais energia específica que o fresamento e o MAF ter gastado 10 vezes mais energia específica que a retificação, os processos abrasivos são fundamentais para produção de peças com melhor qualidade superficial, aumentando assim a longevidade do produto e sua funcionalidade. Por exemplo, em termos de aplicação do aço inox 316L na área biomédica, a rugosidade possui influência nos mecanismos da osseointegração de implantes. Assim como a resistência à corrosão.
- Devido ao seu longo tempo de processamento inerente, o polimento compunha a maior parte da energia específica (95,5-99,7% do total). Portanto, uma cadeia de processo com um tempo de polimento reduzido ajuda a reduzir a energia específica geral. Sendo assim, apesar da adição de retificação na cadeia de processamento ter reduzido ligeiramente a taxa de remoção de material no polimento, o processo foi benéfico pois ajudou a reduzir o tempo necessário para o polimento, resultando em uma redução da energia específica geral.
- O aumento da rotação do fuso no MAF leva a um incremento da taxa de remoção de material e, conseqüentemente, melhor qualidade superficial em menor tempo de polimento. Em contrapartida, ocorre a redução da área polida, devido à diferente densidade de fluxo magnético no centro e na borda do ímã. Assim, dois principais requisitos técnicos necessários devem ser satisfeitos para que o processo de polimento por MAF seja realizado de forma eficiente: 1) focar o campo magnético em direção à área de superfície a ser polida e 2) evitar o contato direto da escova de partículas com o substrato de aço para evitar a quebra da escova flexível. O primeiro item pode ser solucionado pela adição de polo magnético e o segundo pode ser resolvido pela colocação de blocos falsos ao lado da amostra.
- O MAF de alta velocidade, obtido pelo aumento da velocidade de rotação do fuso e avanço, é viável, e contribui para o aumento da taxa de remoção de material e a redução da energia específica geral da cadeia de processo pós-DED. No entanto, um aumento excessivo na velocidade de rotação da escova de partículas reduz o número de partículas engajadas na superfície da peça.

5.2 Limitações e propostas de continuidade

Tendo em vista as limitações operacionais¹ enfrentadas durante a realização desta tese e sugestões de continuidade, a seguir serão listadas algumas propostas para pesquisas futuras.

- Inserir outras operações de pós-processamento na cadeia de processo, podendo ser por polimento eletrolítico, químico ou a laser, entre outros.
- Estudar o impacto do pós-processamento nas propriedades físico-mecânicas (módulo de elasticidade, limite de escoamento, limite de ruptura, entre outros). Além da verificação do impacto na resistência à corrosão, desgaste, fadiga, entre outras características.
- Comparar a capacidade de pós-processamento do aço inoxidável 316L produzido por DED e outras técnicas de MA. Além de correlacionar com o mesmo material obtido por diferentes processos tradicionais de manufatura (laminação, forjamento, fundição, entre outros), avaliando suas características físico-mecânicas, tais como microestrutura, dureza, limite de escoamento, ductilidade, etc. Nesse quesito, tratamentos térmicos também podem ser aplicados para alteração das propriedades de interesse.
- Pós-processar outras geometrias fabricadas por MA, tais como componentes internos de difícil acesso, complexas, entre outras. Nesse sentido, pode-se investigar a viabilidade de fabricação de moldes e matrizes, fundamentais na área de injeção e forjamento.
- Reduzir a rugosidade de peças fabricadas por DED a níveis subnanométricos. Para tal, pode-se alterar as condições de polimento (campo e força magnética) e os parâmetros (distância entre polo e peça, rotação, abrasivos, entre outros).
- Desenvolver uma ferramenta híbrida (fases com abrasivos fixos e soltos) para o MAF.
- Eliminar ou minimizar a geração de pites (pequenas crateras) no polimento.
- Alterar o estado de tensão residual com o polimento, visando induzir tensão de compressão por meio do processo de *magnetic field-assisted burnishing*(MAB_{ur}).
- Implementar sistemas periféricos e auxiliares na máquina para aumentar a eficiência do processo de retificação. Nesse quesito, pode-se citar outros métodos de dressagem (por exemplo, dressagem de contato, com laser, dressadores rotativos, entre outros) e monitoramento (emissão acústica, podendo ser medido por transdutores ultrassônicos piezoelétricos; temperatura, obtida por termopares; vibração, pode ser adquirida por acelerômetros; entre outras medidas).
- Avaliar o desgaste das ferramentas utilizadas no fresamento, retificação e MAF (partículas abrasivas).

¹ Principalmente em função das restrições à realização de testes laboratoriais, devido à pandemia do COVID-19.

- Analisar a perda progressiva da agressividade do rebolo durante a operação (capacidade de remoção de material) e volume desgastado do rebolo (Z_s) (ligado à relação G e vida útil da ferramenta).
- Construir indicadores de sustentabilidade (critérios econômicos, sociais e ambientais) de toda cadeia de processo realizada em máquinas híbridas. Tendo em vista que máquinas híbridas (MA+usinagem) podem melhorar ainda mais a sequência de fabricação, economizando tempo, recursos e custos, realizando toda a sequência (MA+fresamento+retificação+MAF) dentro da mesma máquina e com a peça na mesma posição.
- Caracterizar a superfície após cada operação de pós-processamento por outras técnicas, tais como XPS (avaliar a energia superficial), espectroscopia Raman (identificar os óxidos formados durante o pós-processamento), microscopia eletrônica de transmissão (identificar os deslocamento das células na região da usinagem), difração de retroespalhamento de elétrons (do inglês, *Electron backscatter diffraction* – EBSD, para análise de orientação cristalográfica), entre outras.

REFERÊNCIAS

3DPRINTING. *What is 3D Printing?* 2020. Disponível em: 3dprinting.com. Citado na página 50.

ABELLÁN-NEBOT, J. V.; SILLER, H. R.; VILA, C.; RODRÍGUEZ, C. A. An experimental study of process variables in turning operations of Ti-6Al-4V and Cr-Co spherical prostheses. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 63, n. 9-12, p. 887–902, 2012. DOI: [10.1007/s00170-012-3955-0](https://doi.org/10.1007/s00170-012-3955-0). Citado na página 111.

ADAIR, S. T.; ATTWOOD, P. A. In-service stress corrosion cracking of AISI 316L stainless steel in an H₂S environment. **Corrosion Engineering Science and Technology**, v. 49, n. 5, p. 396–400, 2014. DOI: [10.1179/1743278213Y.0000000141](https://doi.org/10.1179/1743278213Y.0000000141). Citado na página 41.

ADDISPACE. **Diagnosis and study of opportunities of metallic additive manufacturing on SUDOE aerospace sector**. Interreg, Sudoe and ADDISPACE, 2017. Disponível em: <http://www.addispace.eu/>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

AHN, D. G.; LEE, H. J.; CHO, J. R.; GUK, D. S. Improvement of the wear resistance of hot forging dies using a locally selective deposition technology with transition layers. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1, p. 257–260, 2016. DOI: [10.1016/j.cirp.2016.04.013](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.013). Citado 2 vezes nas páginas 3 e 17.

AL-AHMARI, A.; ASHFAQ, M.; ALFAIFY, A.; ABDO, B.; ALOMAR, A.; DAWUD, A. Predicting surface quality of γ -TiAl produced by additive manufacturing process using response surface method. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 30, n. 1, p. 345–352, 2016. DOI: [10.1007/s12206-015-1239-y](https://doi.org/10.1007/s12206-015-1239-y). Citado na página 44.

ALHARBI, N. Shot peening of selective laser-melted SS316L with ultrasonic frequency. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 119, n. 3-4, p. 2285–2299, 2022. DOI: [10.1007/s00170-021-08398-0](https://doi.org/10.1007/s00170-021-08398-0). Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.

ALLEN, J. An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts. **Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing**, p. 17–1 – 17–10, 2006. Citado na página 33.

ALTAREVA, G. I.; VOROB'eva, L. A.; GAFAROV, R. R.; EFREMOV, V. D.; SKVORCHEVSKII, N. Y.; KALINA, V. N. Use of magnetic abrasive machining for sharpening of medical instrument blades. **Biomedical Engineering**, v. 26, n. 3, p. 148–152, 1992. DOI: [10.1007/BF01674363](https://doi.org/10.1007/BF01674363). Citado na página 58.

AMANOV, A. Effect of local treatment temperature of ultrasonic nanocrystalline surface modification on tribological behavior and corrosion resistance of stainless steel 316L produced by selective laser melting. **Surface and Coatings Technology**, v. 398, n. June, p. 126080, 2020. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.126080](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126080). Citado na página 44.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2546 - 07: Standard Practice for Instrumented Indentation Testing**. 2007. DOI: [10.1520/E2546-07](https://doi.org/10.1520/E2546-07). Citado na página 99.

_____. **ASTM E384 - 17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. 2017. DOI: [10.1520/E0384-17](https://doi.org/10.1520/E0384-17). Citado na página 99.

_____. **ASTM A262-15R21: Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels**. 2021. DOI: [10.1520/A0262-15R21](https://doi.org/10.1520/A0262-15R21). Citado na página 99.

AMORIM, H. J. **Estudo da influência das características do elemento aglutinante sobre o processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo**. Tese (phdthesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 126 f. Citado na página 63.

AN, L.; WANG, D.; ZHU, D. Combined electrochemical and mechanical polishing of interior channels in parts made by additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 51, n. January, p. 102638, 2022. DOI: [10.1016/j.addma.2022.102638](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102638). Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.

ANSARI, M.; JABARI, E.; TOYSERKANI, E. Opportunities and challenges in additive manufacturing of functionally graded metallic materials via powder-fed laser directed energy deposition: A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 294, n. November 2020, p. 117117, 2021. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2021.117117](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117117). Citado 2 vezes nas páginas 3 e 20.

ASTM. F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. **Rapid Manufacturing Association**, p. 10–12, 2013. DOI: [10.1520/F2792-12A.2](https://doi.org/10.1520/F2792-12A.2). Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.

ATTARAN, M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. **Business Horizons**, v. 60, n. 5, p. 677–688, 2017. DOI: [10.1016/j.bushor.2017.05.011](https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011). Citado na página 34.

AURICH, J. C.; KIRSCH, B.; SETTI, D.; AXINTE, D.; BEAUCAMP, A.; BUTLER-SMITH, P.; YAMAGUCHI, H. Abrasive processes for micro parts and structures. **CIRP Annals**, v. 68, n. 2, p. 653–676, 2019. DOI: [10.1016/j.cirp.2019.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.006). Citado na página 59.

AXINTE, D.; GUO, Y.; LIAO, Z.; SHIH, A. J.; M'SAOUBI, R.; SUGITA, N. Machining of biocompatible materials — Recent advances. **CIRP Annals**, CIRP, v. 68, n. 2, p. 629–652, 2019. DOI: [10.1016/j.cirp.2019.05.003](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.003). Citado 2 vezes nas páginas 3 e 41.

AYDOGAN, B.; O'NEIL, A.; SAHASRABUDHE, H. Microstructural and mechanical characterization of stainless steel 420 and inconel 718 multi-material structures fabricated using laser directed energy deposition. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 68, p. 1224–1235, 2021. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.06.031](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.031). Citado na página 3.

BAGEHORN, S.; WEHR, J.; MAIER, H. J. Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. **International Journal of Fatigue**, v. 102, p. 135–142, 2017. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.05.008](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.05.008). Citado na página 45.

BAJAJ, P.; HARIHARAN, A.; KINI, A.; KÜRNSTEINER, P.; RAABE, D.; JÄGLE, E. A. Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties. **Materials Science and Engineering A**, v. 772, 2020. DOI: [10.1016/j.msea.2019.138633](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138633). Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

BALART, M. J.; BOUZINA, A.; EDWARDS, L.; FITZPATRICK, M. E. The onset of tensile residual stresses in grinding of hardened steels. **Materials Science and Engineering A**, v. 367, n. 1-2, p. 132–142, 2004. DOI: [10.1016/j.msea.2003.10.239](https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.239). Citado na página 127.

BANDYOPADHYAY, A.; HEER, B. Additive manufacturing of multi-material structures. **Materials Science and Engineering R: Reports**, v. 129, p. 1–16, 2018. DOI: [10.1016/j.mser.2018.04.001](https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001). Citado 2 vezes nas páginas 19 e 32.

BARON, Y. M. **Finishing, Improvement of Wearing and Hardening Using Magnetic Field**. 9th. ed. Saint-Petersburg: Create Space Independent Publishing Platform, 2008. Citado na página 58.

BEAUCAMP, A. T.; NAMBA, Y.; CHARLTON, P.; JAIN, S.; GRAZIANO, A. A. Finishing of additively manufactured titanium alloy by shape adaptive grinding (SAG). **Surface Topography: Metrology and Properties**, v. 3, n. 2, 2015. DOI: [10.1088/2051-672X/3/2/024001](https://doi.org/10.1088/2051-672X/3/2/024001). Citado na página 45.

BENNETT, J.; GARCIA, D.; KENDRICK, M.; HARTMAN, T.; HYATT, G.; EHMANN, K.; YOU, F.; CAO, J. Repairing Automotive Dies with Directed Energy Deposition: Industrial Application and Life Cycle Analysis. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 141, n. 2, 2018. DOI: [10.1115/1.4042078](https://doi.org/10.1115/1.4042078). Citado 2 vezes nas páginas 3 e 56.

BIRNBAUM, A.; AGGARANGSI, P.; BEUTH, J. Process Scaling and Transient Melt Pool Size Control in Laser-Based Additive Manufacturing Processes. **Proceedings of the 14th Solid Freeform Fabrication Symposium**, p. 328–339, 2003. Citado na página 50.

BLINN, B.; GRECO, S.; SMAGA, M.; ZIMMERMANN, M.; HOTZ, H.; MÜLLER, D.; HARTIG, J.; KIRSCH, B.; AURICH, J. C.; BECK, T. Influence of microstructural defects and the surface topography on the fatigue behavior of “additively-subtractively” manufactured specimens made of AISI 316L. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 52, n. 5, p. 561–577, 2021. DOI: [10.1002/mawe.202000266](https://doi.org/10.1002/mawe.202000266). Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.

BOGGS, T.; CARROLL, R.; TRAN-SON-TAY, R.; YAMAGUCHI, H.; AL-MOUSILY, F.; DEGROFF, C. Blood Cell Adhesion on a Polymeric Heart Valve Leaflet Processed Using Magnetic Abrasive Finishing. **Journal of Medical Devices**, v. 8, n. 1, p. 1–8, 2014. DOI: [10.1115/1.4025853](https://doi.org/10.1115/1.4025853). Citado na página 58.

BOISSONNEAULT, T. **Honda uses AM and generative design to optimize crankshaft**. 2020. Disponível em: 3dprintingmedia.network. Citado na página 16.

BOURELL, D.; KRUTH, J. P.; LEU, M.; LEVY, G.; ROSEN, D.; BEESE, A. M.; CLARE, A. Materials for additive manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 2, p. 659–681, 2017. DOI: [10.1016/j.cirp.2017.05.009](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009). Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 36.

BOURELL, D.; MARCUS, H.; BARLOW, J.; BEAMAN, J. Selective laser sintering of metals and ceramics. **International Journal of Powder Metallurgy**, v. 28, n. 4, p. 369–381, 1992. DOI: [10.1016/0026-0657\(93\)90473-6](https://doi.org/10.1016/0026-0657(93)90473-6). Citado na página 37.

BOURELL, D. L. D.; BEAMAN, J. J.; LEU, M. C.; ROSEN, D. W. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. **Proceedings of RapidTech: US-Turkey Workshop on Workshop on Rapid Technologies**, n. 2, p. 1–8, 2009. DOI: [10.1089/3dp.2013.0002](https://doi.org/10.1089/3dp.2013.0002). Citado na página 1.

- BRANDT, M. Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications. In: _____. United Kingdom: Woodhead Publishing - Elsevier, 2017. cap. Chapter 1 - The role of lasers in additive manufacturing, p. 259–279. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.
- BREME, H.; BIEHL, V.; REGER, N.; GAWALT, E. Handbook of Biomaterial Properties. In: _____. 2nd. ed. New York: Springer, 2016. cap. Chapter 1a - Metallic Biomaterials: Introduction, p. 151–158. DOI: [10.1007/978-1-4939-3305-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3305-1). Citado na página 3.
- BRINKSMEIER, E.; LEVY, G.; MEYER, D.; SPIERINGS, A. B. Surface integrity of selective-laser-melted components. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. 1, p. 601–606, 2010. DOI: [10.1016/j.cirp.2010.03.131](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.131). Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- BROWN, N. J.; BAKER, P. C.; MANEY, R. T. Optical polishing of metals. **Proc. SPIE**, v. 306, p. 42–57, 1981. DOI: [10.1117/12.932717](https://doi.org/10.1117/12.932717). Citado na página 75.
- BRUZZO, F.; CATALANO, G.; DEMIR, A. G.; PREVITALI, B. Surface finishing by laser re-melting applied to robotized laser metal deposition. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 137, 2021. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2020.106391](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106391). Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.
- BUSACHI, A.; ERKOYUNCU, J.; COLEGROVE, P.; MARTINA, F.; WATTS, C.; DRAKE, R. A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 19, p. 117–128, 2017. DOI: [10.1016/j.cirpj.2017.07.001](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.07.001). Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- CAMPBELL, T.; WILLIAMS, C.; IVANOVA, O.; GARRETT, B. Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. **Atlantic Council - strategic foresight report**, n. October, p. 0–15, 2011. Citado na página 14.
- CHANG, S.; LIU, A.; ONG, C. Y. A.; ZHANG, L.; HUANG, X.; TAN, Y. H.; ZHAO, L.; LI, L.; DING, J. Highly effective smoothening of 3D-printed metal structures via overpotential electrochemical polishing. **Materials Research Letters**, v. 7, n. 7, p. 282–289, 2019. DOI: [10.1080/21663831.2019.1601645](https://doi.org/10.1080/21663831.2019.1601645). Citado 2 vezes nas páginas 43 e 47.
- CHEN, L.; RICHTER, B.; ZHANG, X.; BERTSCH, K. B.; THOMA, D. J.; PFEFFERKORN, F. E. Effect of laser polishing on the microstructure and mechanical properties of stainless steel 316L fabricated by laser powder bed fusion. **Materials Science and Engineering A**, v. 802, n. 20 January, p. 140579, 2021. DOI: [10.1016/j.msea.2020.140579](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140579). Citado 3 vezes nas páginas 4, 44 e 46.
- CHEN, Q.; THOUAS, G. A. Metallic implant biomaterials. **Materials Science and Engineering R: Reports**, v. 87, p. 1–57, 2015. DOI: [10.1016/j.mser.2014.10.001](https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001). Citado na página 42.
- COATS, H. P. **Method of and Apparatus for Polishing Containers**. [S.l.], 1940. UUS Patent 2,196,059. Citado na página 58.
- COELHO, R.; AZEVEDO, R.; ASSIS, C. An investigation of anisotropy on AISI 316L obtained by additive manufacturing (AM) measuring surface roughness after micro-endmilling operations. **European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN), Conference Proceedings - 18th International Conference and Exhibition**, n. June, p. 357–358, 2018. Citado na página 44.

CONNER, B. P.; MANOGHARAN, G. P.; MARTOF, A. N.; RODOMSKY, L. M.; RODOMSKY, C. M.; JORDAN, D. C.; LIMPEROS, J. W. Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. **Additive Manufacturing**, v. 1, p. 64–76, 2014. DOI: [10.1016/j.addma.2014.08.005](https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005). Citado na página 33.

CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J. I.; RUIZ, J. E.; UKAR, E.; LAMIKIZ, A. Latest developments in industrial hybrid machine tools that combine additive and subtractive operations. **Materials**, v. 11, n. 12, 2018. DOI: [10.3390/ma11122583](https://doi.org/10.3390/ma11122583). Citado na página 53.

COURTOIS, M.; CARIN, M.; MASSON, P. L.; GAIED, S.; BALABANE, M. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 46, n. 50, 2013. DOI: [10.1088/0022-3727/46/50/505305](https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/50/505305). Citado na página 54.

DABWAN, A.; ANWAR, S.; AL-SAMHAN, A. M.; ALFAIFY, A.; NASR, M. M. Investigations on the effect of layers' thickness and orientations in the machining of additively manufactured stainless steel 316L. **Materials**, v. 14, n. 7, 2021. DOI: [10.3390/ma14071797](https://doi.org/10.3390/ma14071797). Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

DAHOTRE, N. B.; HARIMKAR, S. P. **Laser Fabrication and Machining of Materials**. 1. ed. Knoxville: Springer, 2008. 1–561 p. Citado 3 vezes nas páginas 50, 51 e 52.

DAS, M.; BHATTACHARYA, K.; DITTRICK, S. A.; MANDAL, C.; BALLA, V. K.; Sampath Kumar, T. S.; BANDYOPADHYAY, A.; MANNA, I. In situ synthesized TiB-TiN reinforced Ti6Al4V alloy composite coatings: Microstructure, tribological and in-vitro biocompatibility. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 29, p. 259–271, 2014. DOI: [10.1016/j.jmbbm.2013.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.09.006). Citado na página 56.

DASS, A.; MORIDI, A. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. **Coatings**, v. 9, n. 7, 2019. DOI: [10.3390/COATINGS9070418](https://doi.org/10.3390/COATINGS9070418). Citado 4 vezes nas páginas 51, 52, 53 e 54.

DAVIES, S. **Carbon 3D printing technology used to produce Lamborghini dashboard air vents**. 2019. Disponível em: tctmagazine.com. Citado na página 16.

DAVIS, J. R. Handbook of Materials for Medical Devices. In: _____. [S.l.]: ASM International, 2003. cap. Chapter 3 - Metallic Materials, p. 21–50. DOI: [10.1361/hmmd2003p021](https://doi.org/10.1361/hmmd2003p021). Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

DAWES, J.; BOWERMAN, R.; TREPLETON, R. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain. **Johnson Matthey Technology Review**, v. 59, n. 3, p. 243–256, 2015. DOI: [10.1595/205651315X688686](https://doi.org/10.1595/205651315X688686). Citado na página 26.

DEBROY, T.; WEI, H. L.; ZUBACK, J. S.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J. W.; MILEWSKI, J. O.; BEESE, A. M.; WILSON-HEID, A.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112–224, 2018. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001). Citado 8 vezes nas páginas 2, 3, 18, 23, 24, 55, 108 e 122.

DEHOFF, R.; DUTY, C.; PETER, W.; YAMAMOTO, Y.; CHEN, W.; BLUE, C.; TALLMAN, C. Case study: Additive manufacturing of aerospace brackets. **Advanced Materials and Processes**, v. 171, n. 3, p. 19–22, 2013. Citado na página 33.

- DILBEROGLU, U. M.; GHAREHPAPAGH, B.; YAMAN, U.; DOLEN, M. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 545–554, 2017. DOI: [10.1016/j.promfg.2017.07.148](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148). Citado na página 20.
- DING, W.; ZHANG, L.; LI, Z.; ZHU, Y.; SU, H.; XU, J. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 88, n. 9-12, p. 2939–2968, 2017. DOI: [10.1007/s00170-016-8998-1](https://doi.org/10.1007/s00170-016-8998-1). Citado na página 127.
- DING, Y.; DWIVEDI, R.; KOVACEVIC, R. Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 44, p. 67–76, 2017. DOI: [10.1016/j.rcim.2016.08.008](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.08.008). Citado na página 36.
- DULEBA, B.; GRESKOVIC, F.; SIKORA, J. W. Materials and finishing methods of DMLS manufactured parts. **Transfer inovácií**, n. 2, p. 143–148, 2011. Citado na página 38.
- DUTTA, B.; BABU, S.; JARED, B. Science, technology and applications of metals in additive manufacturing. In: _____. [S.l.: s.n.], 2019. cap. Chapter 4 - Raw materials for metal additive manufacturing, p. 77–91. DOI: [10.1016/b978-0-12-816634-5.00004-2](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816634-5.00004-2). Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.
- EL-KHABEERY, M. M.; FATTOUH, M. Residual stress distribution caused by milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 29, n. 3, p. 391–401, 1989. DOI: [10.1016/0890-6955\(89\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0890-6955(89)90008-4). Citado na página 127.
- ELIAZ, N. Corrosion of metallic biomaterials: A review. **Materials**, v. 12, n. 3, 2019. DOI: [10.3390/ma12030407](https://doi.org/10.3390/ma12030407). Citado na página 42.
- EMMELMANN, C.; HERZOG, D.; KRANZ, J. Laser additive manufacturing: Materials, design, technologies, and applications. In: _____. United Kingdom: Woodhead Publishing - Elsevier, 2017. cap. Chapter 10 - Design for laser additive manufacturing, p. 259–279. Citado na página 36.
- EVERTON, S. K.; HIRSCH, M.; STAVROULAKIS, P. I.; LEACH, R. K.; CLARE, A. T. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. **Materials and Design**, v. 95, p. 431–445, 2016. DOI: [10.1016/j.matdes.2016.01.099](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.099). Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- EY. **How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain? EY's Global 3D printing Report 2016**. [S.l.], 2016. Citado na página 15.
- EYERS, D. R.; POTTER, A. T. Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective. **Computers in Industry**, v. 92-93, p. 208–218, 2017. DOI: [10.1016/j.compind.2017.08.002](https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.08.002). Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.
- EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult to cut aerospace superalloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, p. 1353–1367, 2005. DOI: [10.1016/j.ijmactools.2005.02.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.02.003). Citado na página 15.
- FAILLE, C.; MEMBRE, J. M.; TISSIER, J. P.; BELLON-FONTAINE, M. N.; CARPENTIER, B.; LAROCHE, M. A.; BENEZECH, T. Influence of physicochemical properties on the hygienic status of stainless steel with various finishes. **Biofouling**, v. 15, n. 4, p. 261–274, 2000. DOI: [10.1080/08927010009386317](https://doi.org/10.1080/08927010009386317). Citado na página 41.

FAN, Z.; TIAN, Y.; ZHOU, Q.; SHI, C. Enhanced magnetic abrasive finishing of Ti–6Al–4V using shear thickening fluids additives. **Precision Engineering**, v. 64, n. 266, p. 300–306, 2020. DOI: [0.1016/j.precisioneng.2020.05.001](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.05.001). Citado na página 63.

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**, v. 101, p. 79–101, 2016. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007). Citado na página 57.

FOX, M.; AGRAWAL, K.; SHINMURA, T.; KOMANDURI, R. Magnetic Abrasive Finishing of Rollers. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 43, n. 1, p. 181–184, 1994. DOI: [10.1016/S0007-8506\(07\)62191-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62191-X). Citado na página 58.

FRAZIER, W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, n. 6, p. 1917–1928, 2014. DOI: [10.1007/s11665-014-0958-z](https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z). Citado 3 vezes nas páginas 18, 31 e 32.

FRITZ, A. H.; SCHULZE, G. (Ed.). **Fertigungstechnik**. 9th. ed. New York: Springer, 2010. Citado na página 38.

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, n. 1, p. 133–145, 2002. DOI: [10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2). Citado na página 125.

GANGULY, V.; SCHMITZ, T.; GRAZIANO, A.; YAMAGUCHI, H. Force measurement and analysis for magnetic field-assisted finishing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 135, n. 4, p. 1–9, 2013. DOI: [10.1115/1.4023723](https://doi.org/10.1115/1.4023723). Citado na página 72.

GAO, W.; ZHANG, Y.; RAMANUJAN, D.; RAMANI, K.; CHEN, Y.; WILLIAMS, C. B.; WANG, C. C.; SHIN, Y. C.; ZHANG, S.; ZAVATTIERI, P. D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, v. 69, p. 65–89, 2015. DOI: [10.1016/j.cad.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001). Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 34, 35 e 48.

GAO, Y.; ZHAO, Y.; ZHANG, G.; YIN, F.; ZHANG, H. Modeling of material removal in magnetic abrasive finishing process with spherical magnetic abrasive powder. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 177, p. 105601, 2020. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2020.105601](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105601). Citado 4 vezes nas páginas 75, 76, 79 e 81.

GARTHE, K. U.; HOYER, K. P.; HAGEN, L.; TILLMANN, W.; SCHAPER, M. Correlation between pre- and post-treatments of additively manufactured 316L parts and the resulting low cycle fatigue behavior. **Rapid Prototyping Journal**, v. 28, n. 5, p. 833–840, 2021. DOI: [10.1108/RPJ-01-2021-0017](https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2021-0017). Citado na página 43.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. Second edition. [S.l.]: Springer, 2015. DOI: [10.1007/978-1-4939-2113-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3). Citado 14 vezes nas páginas 1, 2, 4, 10, 23, 24, 48, 51, 52, 53, 56, 122, 125 e 126.

GISARIO, A.; KAZARIAN, M.; MARTINA, F.; MEHRPOUYA, M. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 53, n. September, p. 124–149, 2019. DOI: [10.1016/j.jmsy.2019.08.005](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005). Citado na página 15.

- GONG, Y.; LI, P. Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 33, n. 5, p. 2387–2395, 2019. DOI: [10.1007/s12206-019-0237-x](https://doi.org/10.1007/s12206-019-0237-x). Citado na página 44.
- GRAZIANO, A. A.; GANGULY, V.; BULLARD, J. W.; YAMAGUCHI, H. Characteristics of Cobalt Chromium Alloy Surfaces Finished Using Magnetic Abrasive Finishing. **Proceedings of the ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC)**, n. 6544, p. 1–8, 2012. Citado na página 58.
- GRAZIANO, A. A.; GANGULY, V.; SCHMITZ, T.; YAMAGUCHI, H. Control of lay on cobalt chromium alloy finished surfaces using magnetic abrasive finishing and its effect on wettability. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 136, n. 3, p. 1–8, 2014. DOI: [10.1115/1.4026935](https://doi.org/10.1115/1.4026935). Citado na página 58.
- GRECO, S.; KIEREN-EHSES, S.; KIRSCH, B.; AURICH, J. C. Micro milling of additively manufactured AISI 316L: impact of the layerwise microstructure on the process results. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 112, n. 1-2, p. 361–373, 2021. DOI: [10.1007/s00170-020-06387-3](https://doi.org/10.1007/s00170-020-06387-3). Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- GRIDLOGICS, T. P. L. 3D Printing Technology Insight Report: An analysis of patenting activity around 3D-Printing from 1990-Current. p. 1–44, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 18, 35 e 36.
- GRIFFITHS, L.; O'CONNOR, D.; DAVIES, S. **The latest 3D printing efforts against Covid-19**. 2020. Disponível em: tctmagazine.com. Citado na página 16.
- GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Process, and Systems**. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. Citado na página 60.
- GUO, D.; YAN, K.; CALLAGHAN, M. D.; DAISENBERGER, D.; CHATTERTON, M.; CHEN, J.; WISBEY, A.; MIRIHANAGE, W. Solidification microstructure and residual stress correlations in direct energy deposited type 316L stainless steel. **Materials and Design**, v. 207, p. 109782, 2021. DOI: [10.1016/j.matdes.2021.109782](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109782). Citado 2 vezes nas páginas 85 e 126.
- GUO, J.; AU, K. H.; LIU, K.; NG, S. T.; SHAW, K. C. S. A novel vibration-assisted magnetic abrasive polishing method for complex internal surface finishing. In: **Proceedings of the 17th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN 2017**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 161–162. Citado na página 69.
- GUO, J.; AU, K. H.; SUN, C. N.; GOH, M. H.; KUM, C. W.; LIU, K.; WEI, J.; SUZUKI, H.; KANG, R. Novel rotating-vibrating magnetic abrasive polishing method for double-layered internal surface finishing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 264, p. 422–437, 2019. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2018.09.024](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.09.024). Citado na página 69.
- GUO, J.; BAI, J.; LIU, K.; WEI, J. Surface quality improvement of selective laser sintered polyamide 12 by precision grinding and magnetic field-assisted finishing. **Materials and Design**, v. 138, p. 39–45, 2018. DOI: [10.1016/j.matdes.2017.10.048](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.048). Citado 2 vezes nas páginas 45 e 69.
- GUO, J.; GOH, M.; ZHU, Z.; LEE, X.; NAI, M. L. S.; WEI, J. On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi high-entropy alloy. **Materials and Design**, v. 153, p. 211–220, 2018. DOI: [10.1016/j.matdes.2018.05.012](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.012). Citado na página 45.
- HAGHDADI, N.; LALEH, M.; MOYLE, M.; PRIMIG, S. Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges. **Journal of Materials Science**, v. 56, n. 1, p. 64–107, 2021. DOI: [10.1007/s10853-020-05109-0](https://doi.org/10.1007/s10853-020-05109-0). Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

HARUN, W. S.; KAMARIAH, M. S.; MUHAMAD, N.; GHANI, S. A.; AHMAD, F.; MOHAMMED, Z. A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials. **Powder Technology**, v. 327, p. 128–151, 2018. DOI: [10.1016/j.powtec.2017.12.058](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.058). Citado 4 vezes nas páginas 3, 23, 41 e 42.

HASHIMOTO, F.; YAMAGUCHI, H.; KRAJNIK, P.; WEGENER, K.; CHAUDHARI, R.; HOFFMEISTER, H. W.; KUSTER, F. Abrasive fine-finishing technology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 2, p. 597–620, 2016. DOI: [10.1016/j.cirp.2016.06.003](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.003). Citado 2 vezes nas páginas 107 e 133.

HASSUI, A.; DINIZ, A. E. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 855–862, 2003. DOI: [10.1016/S0890-6955\(03\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00049-X). Citado 2 vezes nas páginas 88 e 103.

HENG, L.; KIM, Y. J.; MUN, S. D. Review of Superfinishing by the Magnetic Abrasive Finishing Process. **High Speed Machining**, v. 3, n. 1, p. 42–55, 2017. DOI: [10.1515/hsm-2017-0004](https://doi.org/10.1515/hsm-2017-0004). Citado 6 vezes nas páginas 6, 59, 61, 64, 72 e 73.

HIEMENZ, J. **3D printing jigs, fixtures and other manufacturing tools**. 2015. Disponível em: co.uk. Citado na página 17.

HIRANO, T.; FURUKI, T.; KOUSAKA, H. Derivation of optimum abrasive for improving magnetic polishing rate for hybrid metal AM titanium alloy and creating a polishing prediction model. **International Journal of Abrasive Technology**, v. 10, n. 2, p. 106–121, 2020. DOI: [10.1504/IJAT.2020.109871](https://doi.org/10.1504/IJAT.2020.109871). Citado 2 vezes nas páginas 45 e 70.

HIRSCH, J. E. An index to quantify an individual's scientific research output. **PNAS**, v. 102, n. 46, p. 16569–16572, 2005. Citado na página 13.

HOFMANN, D. C.; KOLODZIEJSKA, J.; ROBERTS, S.; OTIS, R.; DILLON, R. P.; SUH, J. O.; LIU, Z. K.; BORGONIA, J. P. Compositionally graded metals: A new frontier of additive manufacturing. **Journal of Materials Research**, v. 29, n. 17, p. 1899–1910, 2014. DOI: [10.1557/jmr.2014.208](https://doi.org/10.1557/jmr.2014.208). Citado 4 vezes nas páginas 3, 20, 21 e 56.

HOUSHI, M. N. A Comprehensive Review on Magnetic Abrasive Finishing Process. **Advanced Engineering Forum**, v. 18, p. 1–20, 2016. DOI: [10.4028/www.scientific.net/aef.18.1](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.18.1). Citado 2 vezes nas páginas 59 e 64.

HUB, D. 3D printing trends 2020: Industry highlights and market trends. **Trend report 2020**, p. 1–38, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

HUCKSTEPP, A. **Digital Alloys' Guide to Metal Additive Manufacturing – Part 11: Surface Roughness**. [S.l.]: Digital Alloys, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 108.

HWANG, T.; WOO, Y. Y.; HAN, S. W.; MOON, Y. H. Functionally graded properties in directed-energy-deposition titanium parts. **Optics and Laser Technology**, v. 105, p. 80–88, 2018. DOI: [10.1016/j.optlastec.2018.02.057](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.057). Citado na página 20.

IBRAHIM, M. Z.; SARHAN, A. A.; YUSUF, F.; HAMDY, M. Biomedical materials and techniques to improve the tribological, mechanical and biomedical properties of orthopedic implants – A review article. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 714, p. 636–667, 2017. DOI: [10.1016/j.jallcom.2017.04.231](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.231). Citado 2 vezes nas páginas 3 e 42.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4287: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters. **International Organization for Standardization**, p. 25 p., 1997. Citado 2 vezes nas páginas 93 e 99.

IQUEBAL, A. S.; AMRI, S. E.; SHRESTHA, S.; WANG, Z.; MANOGHARAN, G. P.; BUKKAPATNAM, S. Longitudinal Milling and Fine Abrasive Finishing Operations to Improve Surface Integrity of Metal AM Components. **Procedia Manufacturing**, v. 10, p. 990–996, 2017. DOI: [10.1016/j.promfg.2017.07.090](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.090). Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

IQUEBAL, A. S.; SHRESTHA, S.; WANG, Z.; MANOGHARAN, G.; BUKKAPATNAM, S. Influence of Milling and Non-Traditional Machining on Surface Properties of Ti6Al4V EBM Components Influence of Milling and Non-Traditional Machining on Surface. **Proceedings of the 2016 Industrial and Systems Engineering Research Conference**, n. December, p. 4–9, 2016. Citado na página 45.

ISAEV, A.; GRECHISHNIKOV, V.; PIVKIN, P.; MIHAIL, K.; ILYUHIN, Y.; VOROTNIKOV, A. Machining of Thin-walled Parts Produced by Additive Manufacturing Technologies. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 1023–1026, 2016. DOI: [10.1016/j.procir.2015.08.088](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.088). Citado na página 44.

ISHUTOV, S.; JOBE, T. D.; ZHANG, S.; GONZALEZ, M.; AGAR, S. M.; HASIUK, F. J.; WATSON, F.; GEIGER, S.; MACKAY, E.; CHALATURNYK, R. Three-dimensional printing for geoscience: Fundamental research, education, and applications for the petroleum industry. **AAPG Bulletin**, v. 102, n. 1, p. 1–26, 2018. DOI: [10.1306/0329171621117056](https://doi.org/10.1306/0329171621117056). Citado na página 16.

ISO; ASTM. **ISO/TC 261 and ASTM F42: Joint Plan for Additive Manufacturing Standards Development**. 2013. Disponível em: astm.org. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.

JAIN, V. K. Abrasive-based nano-finishing techniques: An overview. **Machining Science and Technology**, v. 12, n. 3, p. 257–294, 2008. DOI: [10.1080/10910340802278133](https://doi.org/10.1080/10910340802278133). Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.

_____. Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 20, p. 6022–6038, 2009. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2009.08.015](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.015). Citado 3 vezes nas páginas 60, 73 e 74.

JAIN, V. K.; JAYSWAL, S. C.; DIXIT, P. M. Modeling and simulation of surface roughness in magnetic abrasive finishing using non-uniform surface profiles. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 22, n. 2, p. 256–270, 2007. DOI: [10.1080/10426910601134096](https://doi.org/10.1080/10426910601134096). Citado 3 vezes nas páginas 73, 74 e 78.

JAIN, V. K.; KUMAR, P.; BEHERA, P. K.; JAYSWAL, S. C. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process. **Wear**, v. 250-251, p. 384–390, 2001. DOI: [10.1016/S0043-1648\(01\)00642-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00642-1). Citado na página 61.

JARED, B. H.; AGUILO, M. A.; BEGHINI, L. L.; BOYCE, B. L.; CLARK, B. W.; COOK, A.; KAEHR, B. J.; ROBBINS, J. Additive manufacturing: Toward holistic design. **Scripta Materialia**, v. 135, p. 141–147, 2017. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2017.02.029](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.02.029). Citado 3 vezes nas páginas 22, 34 e 36.

JAYSWAL, S. C.; JAIN, V. K.; DIXIT, P. M. Magnetic Abrasive Finishing Process — A Parametric Analysis. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 4, n. 2, p. 131–150, 2005. DOI: [10.1142/S0219686705000655](https://doi.org/10.1142/S0219686705000655). Citado 3 vezes nas páginas 62, 74 e 78.

JIAO, A. Y.; QUAN, H. J.; LI, Z. Z.; ZOU, Y. H. The study of plane magnetic abrasive finishing based on axial pressure. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 17, n. 5, p. 418–433, 2015. DOI: [10.1504/IJMMM.2015.073150](https://doi.org/10.1504/IJMMM.2015.073150). Citado na página 77.

JIN, Y. A.; PLOTT, J.; CHEN, R.; WENSMAN, J.; SHIH, A. Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses - A review. **Procedia CIRP**, v. 36, p. 199–204, 2015. DOI: [10.1016/j.procir.2015.02.125](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.125). Citado na página 16.

JUDAL, K. B.; YADAVA, V. Cylindrical electrochemical magnetic abrasive machining of AISI-304 stainless steel. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 28, n. 4, p. 449–456, 2013. DOI: [10.1080/10426914.2012.736653](https://doi.org/10.1080/10426914.2012.736653). Citado na página 73.

JULLIEN, C.; BÉNÉZECH, T.; CARPENTIER, B.; LEBRET, V.; FAILLE, C. Identification of surface characteristics relevant to the hygienic status of stainless steel for the food industry. **Journal of Food Engineering**, v. 56, n. 1, p. 77–87, 2002. DOI: [10.1016/S0260-8774\(02\)00150-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00150-4). Citado na página 41.

KAHLEN, F. J.; KAR, A. Tensile strengths for laser-fabricated parts and similarity parameters for rapid manufacturing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 123, n. 1, p. 38–44, 2001. DOI: [10.1115/1.1286472](https://doi.org/10.1115/1.1286472). Citado na página 55.

KAJAL, S.; JAIN, V. K.; RAMKUMAR, J.; NAGDEVE, L. Experimental and theoretical investigations into internal magnetic abrasive finishing of a revolver barrel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 100, p. 1105–1122, 2017. DOI: [10.1007/s00170-017-1220-2](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1220-2). Citado na página 58.

KALA, P.; SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Surface roughness modelling for Double Disk Magnetic Abrasive Finishing process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, p. 37–48, 2017. DOI: [10.1016/j.jmapro.2016.10.007](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.10.007). Citado 3 vezes nas páginas 79, 80 e 81.

KANISH, T. C.; NARAYANAN, S.; KUPPAN, P.; ASHOK, S. D. Investigations on the Finishing Forces in Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing of SS316L. **Procedia Engineering**, v. 174, p. 611–620, 2017. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.01.196](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.196). Citado na página 72.

KANISH, T. C.; NARAYANAN, S.; KUPPAN, P.; Denis Ashok, S. Investigations on wear behavior of Magnetic Field Assisted Abrasive Finished SS316L material. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 5, p. 12734–12743, 2018. DOI: [10.1016/j.matpr.2018.02.257](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.257). Citado na página 58.

KAYNAK, Y.; KITAY, O. The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting. **Additive Manufacturing**, v. 26, p. 84–93, 2019. DOI: [10.1016/j.addma.2018.12.021](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.021). Citado 3 vezes nas páginas 4, 44 e 45.

KHATTRI, K.; CHOUDHARY, G.; BHUYAN, B. K.; SELOKAR, A. A Review on Parametric Analysis of Magnetic Abrasive Machining Process. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 330, n. 1, 2018. DOI: [10.1088/1757-899X/330/1/012105](https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012105). Citado na página 61.

- KHOSHNEVIS, B. Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies. **Automation in Construction**, v. 13, n. 1, p. 5–19, 2004. DOI: [10.1016/j.autcon.2003.08.012](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012). Citado na página 16.
- KIM, J. D.; CHOI, M. S. Simulation for the prediction of surface-accuracy in magnetic abrasive machining. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 53, n. 3-4, p. 630–642, 1995. DOI: [10.1016/0924-0136\(94\)01753-N](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01753-N). Citado 3 vezes nas páginas 77, 78 e 79.
- KIRSCH, B.; HOTZ, H.; HARTIG, J.; GRECO, S.; ZIMMERMANN, M.; AURICH, J. C. Pendulum and creep feed grinding of additively manufactured AISI 316L. **Procedia CIRP**, v. 101, p. 166–169, 2020. DOI: [10.1016/j.procir.2020.03.156](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.156). Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Process 2: Grinding, Honing, Lapping**. [S.l.]: Springer, 2009. DOI: [10.1007/978-3-540-92259-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9). Citado na página 60.
- KO, S. L.; BARON, Y. M.; PARK, J. I. Micro deburring for precision parts using magnetic abrasive finishing method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 187-188, p. 19–25, 2007. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2006.11.183](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.183). Citado na página 58.
- KODÁCSY, J.; SZABÓ, A. Burr formation in metal cutting operations and some deburring methods. **Key Engineering Materials**, v. 581, p. 235–240, 2014. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.581.235](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.581.235). Citado na página 58.
- KOESTER, L. W.; BOND, L. J.; TAHERI, H.; COLLINS, P. C. **Nondestructive evaluation of additively manufactured metallic parts: In situ and post deposition. In situ and post deposition**. [S.l.: s.n.], 2019. 401–417 p. DOI: [10.1016/B978-0-12-814062-8.00020-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00020-0). Citado na página 27.
- KOK, Y.; TAN, X. P.; WANG, P.; NAI, M. L.; LOH, N. H.; LIU, E.; TOR, S. B. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. **Materials and Design**, v. 139, p. 565–586, 2018. DOI: [10.1016/j.matdes.2017.11.021](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.021). Citado 2 vezes nas páginas 18 e 48.
- KRZYNAR, N.; PILIPOVIĆ, A.; ŠERCER, M. Additive manufacturing of fixture for automated 3D scanning-Case study. **Procedia Engineering**, v. 149, n. June, p. 197–202, 2016. DOI: [10.1016/j.proeng.2016.06.656](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.656). Citado na página 17.
- KUM, C. W.; SATO, T.; GUO, J.; LIU, K.; BUTLER, D. A novel media properties-based material removal rate model for magnetic field-assisted finishing. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 141, p. 189–197, 2018. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2018.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.04.006). Citado 2 vezes nas páginas 79 e 81.
- KUMAR, H.; SINGH, S.; SRIVASTAVA, A. Parametric Investigations into Internal Surface Modification of Brass Tubes with Alternating Magnetic Field. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 1234–1248, 2016. DOI: [10.1016/j.promfg.2016.08.097](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.097). Citado na página 58.
- KUMARAN, M.; SENTHILKUMAR, V.; Justus Panicke, C. T.; SHISHIR, R. Investigating the residual stress in additive manufacturing of repair work by directed energy deposition process on SS316L hot rolled steel substrate. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 4475–4478, 2021. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.05.319](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.319). Citado na página 126.

KUMBHAR, N. N.; MULAY, A. V. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, v. 99, n. 4, p. 481–487, 2016. DOI: [10.1007/s40032-016-0340-z](https://doi.org/10.1007/s40032-016-0340-z). Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.

KUNČICKÁ, L.; KOCICH, R.; LOWE, T. C. Advances in metals and alloys for joint replacement. **Progress in Materials Science**, v. 88, p. 232–280, 2017. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2017.04.002](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.002). Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

LABEAGA-MARTÍNEZ, N.; SANJURJO-RIVO, M.; DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; MARTÍNEZ-FRÍAS, J. Additive manufacturing for a Moon village. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 794–801, 2017. DOI: [10.1016/j.promfg.2017.09.186](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.186). Citado na página 17.

LEACH, R. K.; BOURELL, D.; CARMIGNATO, S.; DONMEZ, A.; SENIN, N.; DEWULF, W. Geometrical metrology for metal additive manufacturing. **CIRP Annals**, v. 68, n. 2, p. 677–700, 2019. DOI: [10.1016/j.cirp.2019.05.004](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.004). Citado na página 27.

LEE, P.-H.; CHUNG, H.; MCCORMICK, P. S.; KWON, P.; NGUYEN, H.; YANG, Y.; SHAO, C. Experimental and Statistical Study on Magnetic-Field Assisted Finishing of Mold Steel Using Nano-Scale Solid Lubricant and Abrasive Particles. **Proceedings of the ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC)**, n. 6544, p. 1–7, 2018. Citado na página 63.

LI, K.; MA, R.; ZHANG, M.; CHEN, W.; LI, X.; ZHANG, D. Z.; TANG, Q.; MURR, L. E.; LI, J.; CAO, H. Hybrid post-processing effects of magnetic abrasive finishing and heat treatment on surface integrity and mechanical properties of additively manufactured Inconel 718 superalloys. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 128, p. 10–21, 2022. DOI: [10.1016/j.jmst.2022.03.026](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.03.026). Citado na página 71.

LI, N.; HUANG, S.; ZHANG, G.; QIN, R.; LIU, W.; XIONG, H.; SHI, G.; BLACKBURN, J. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 35, n. 2, p. 242–269, 2019. DOI: [10.1016/j.jmst.2018.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002). Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

LI, W.; ZHOU, P.; LIN, W. C.; NTEZIYAREMYE, V.; YAMAGUCHI, H.; GUO, D.; SHIH, A. Effects of needle inner surface topography on friction and biopsy length. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 119, p. 412–418, 2016. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2016.11.005](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.005). Citado na página 58.

LIA, F.; PARK, J.; TRESSLER, J.; MARTUKANITZ, R. Partitioning of laser energy during directed energy deposition. **Additive Manufacturing**, v. 18, p. 31–39, 2017. DOI: [10.1016/j.addma.2017.08.012](https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.012). Citado na página 51.

LIENEKE, T.; ADAM, G. A.; LEUDERS, S.; KNOOP, F.; JOSUPEIT, S.; DELFS, P.; FUNKE, N.; ZIMMER, D. Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions. **Proceedings - 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2015**, p. 371–384, 2015. Citado na página 38.

LIENERT, P. **From Corvette To COVID-19 Response: How 3D Printing Transforms Technology for General Motors**. 2020. Disponível em: news.gm.com. Citado na página 16.

- LIN, J. Laser attenuation of the focused powder streams in coaxial laser cladding. **Journal of Laser Applications**, v. 12, n. 1, p. 28–33, 2000. DOI: [10.2351/1.521910](https://doi.org/10.2351/1.521910). Citado na página 24.
- LINDE, A. M. **Role of gases in AM**. 2018. Citado na página 52.
- LIU, C.; YAN, D.; TAN, J.; MAI, Z.; CAI, Z.; DAI, Y.; JIANG, M.; WANG, P.; LIU, Z.; LI, C. C.; LAO, C.; CHEN, Z. Development and experimental validation of a hybrid selective laser melting and CNC milling system. **Additive Manufacturing**, v. 36, n. May, p. 101550, 2020. DOI: [10.1016/j.addma.2020.101550](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101550). Citado na página 44.
- LIU, G.; DU, D.; WANG, K.; PU, Z.; ZHANG, D.; CHANG, B. High-temperature oxidation behavior of a directionally solidified superalloy repaired by directed energy deposition. **Corrosion Science**, v. 193, 2021. DOI: [10.1016/j.corsci.2021.109918](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109918). Citado na página 3.
- LIU, Z.; WANG, X.; KIM, H.; ZHOU, Y.; CONG, W.; ZHANG, H. Investigations of Energy Density Effects on Forming Accuracy and Mechanical Properties of Inconel 718 Fabricated by LENS Process. **Procedia Manufacturing**, v. 26, p. 731–739, 2018. DOI: [10.1016/j.promfg.2018.07.083](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.083). Citado na página 53.
- LOH, G. H.; PEI, E.; HARRISON, D.; MONZÓN, M. D. An overview of functionally graded additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 23, p. 34–44, 2018. DOI: [10.1016/j.addma.2018.06.023](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.023). Citado na página 20.
- LOU, X.; SONG, M.; EMIGH, P. W.; OTHON, M. A.; ANDRESEN, P. L. On the stress corrosion crack growth behaviour in high temperature water of 316L stainless steel made by laser powder bed fusion additive manufacturing. **Corrosion Science**, v. 128, n. September, p. 140–153, 2017. DOI: [10.1016/j.corsci.2017.09.017](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.09.017). Citado na página 41.
- MA, M.; WANG, Z.; ZENG, X. A comparison on metallurgical behaviors of 316L stainless steel by selective laser melting and laser cladding deposition. **Materials Science and Engineering A**, v. 685, p. 265–273, 2017. DOI: [10.1016/j.msea.2016.12.112](https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.112). Citado 2 vezes nas páginas 85 e 126.
- MACHADO, A. R.; ABRAO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. [S.l.]: Blucher, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 112 e 113.
- MAHAMOOD, R.; AKINLABI, E.; SHUKLA, D. M.; PITYANA, S. Revolutionary additive manufacturing: an overview. **Lasers in Engineering**, v. 27, n. 3, p. 161–178, 2014. Citado na página 22.
- MAHMOOD, M. A.; CHIOIBASU, D.; REHMAN, A. U.; MIHAI, S.; POPESCU, A. C. Post-Processing Techniques to Enhance the Quality of Metallic Parts Produced by Additive Manufacturing. **Metals**, v. 12, n. 1, 2022. DOI: [10.3390/met12010077](https://doi.org/10.3390/met12010077). Citado na página 31.
- MALEKI, E.; BAGHERIFARD, S.; BANDINI, M.; GUAGLIANO, M. Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities. **Additive Manufacturing**, v. 37, p. 101619, 2021. DOI: [10.1016/j.addma.2020.101619](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101619). Citado 2 vezes nas páginas 37 e 57.
- MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2. ed. New York: Industrial Press, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 4, 46, 89 e 133.

- MANIVASAGAM, G.; DHINASEKARAN, D.; RAJAMANICKAM, A. Biomedical Implants: Corrosion and its Prevention - A Review. **Recent Patents on Corrosion Science**, v. 2, n. 1, p. 40–54, 2010. DOI: [10.2174/1877610801002010040](https://doi.org/10.2174/1877610801002010040). Citado na página 42.
- MAPAL. **MAPAL Technology Magazine**. 2015. Disponível em: collyverkstadsteknik.se. Citado na página 17.
- MASEK, P.; FORNUSEK, T.; ZEMAN, P.; BUCKO, M.; SMOLIK, J.; HEINRICH, P. Machinability the aisi 316 stainless steel after processing by various methods of 3D printing. **MM Science Journal**, v. 2019, n. November, p. 3338–3346, 2019. DOI: [10.17973/MMSJ.2019112019091](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019112019091). Citado na página 44.
- MATTEI, L.; Di Puccio, F.; PICCIGALLO, B.; CIULLI, E. Lubrication and wear modelling of artificial hip joints: A review. **Tribology International**, v. 44, n. 5, p. 532–549, 2011. DOI: [10.1016/j.triboint.2010.06.010](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.06.010). Citado na página 41.
- MATWEB. **Online Materials Information Resource**. 2022. Disponível em: matweb.com. Citado na página 97.
- MEARIAN, L. **Inside Ford's 3D Printing Lab, where thousands of parts are made**. 2014. Disponível em: computerworld.com. Citado na página 16.
- MELIA, M. A.; DURAN, J. G.; KOEPKE, J. R.; SAIZ, D. J.; JARED, B. H.; SCHINDELHOLZ, E. J. How build angle and post-processing impact roughness and corrosion of additively manufactured 316L stainless steel. **NPJ Materials Degradation**, v. 4, n. 1, p. 1–11, 2020. DOI: [10.1038/s41529-020-00126-5](https://doi.org/10.1038/s41529-020-00126-5). Citado 3 vezes nas páginas 4, 44 e 47.
- MERCELIS, P.; KRUTH, J. P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. **Rapid Prototyping Journal**, v. 12, n. 5, p. 254–265, 2006. DOI: [10.1108/13552540610707013](https://doi.org/10.1108/13552540610707013). Citado na página 126.
- MESICEK, J.; MA, Q. P.; HAJNYS, J.; ZELINKA, J.; PAGAC, M.; PETRU, J.; MIZERA, O. Abrasive surface finishing on slm 316l parts fabricated with recycled powder. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 6, 2021. DOI: [10.3390/app11062869](https://doi.org/10.3390/app11062869). Citado na página 43.
- MILTON, S.; MORANDEAU, A.; CHALON, F.; LEROY, R. Influence of Finish Machining on the Surface Integrity of Ti6Al4V Produced by Selective Laser Melting. **Procedia CIRP**, v. 45, p. 127–130, 2016. DOI: [10.1016/j.procir.2016.02.340](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.340). Citado na página 45.
- MISRA, A.; M. Pandey, P.; DIXIT, U. S. Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 131-132, p. 853–867, 2017. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2017.07.023](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.023). Citado na página 79.
- MISRA, A.; PANDEY, P. M.; DIXIT, U. S. Modeling and simulation of surface roughness in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 133, p. 344–356, 2017. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2017.08.056](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.08.056). Citado 2 vezes nas páginas 79 e 81.
- MONZÓN, M. D.; ORTEGA, Z.; MARTÍNEZ, A.; ORTEGA, F. Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 5-8, p. 1111–1121, 2014. DOI: [10.1007/s00170-014-6334-1](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6334-1). Citado na página 27.

MORIMOTO, Y.; KATO, H.; HASEGAWA, A.; TAKASUGI, K.; STEIN, M.; YAMAGUCHI, H. Combination of non-axisymmetric curved surface turning and magnetic abrasive finishing. **International Symposium on Flexible Automation**, p. 296–301, 2018. Citado na página 6.

NAJMON, J. C.; RAEISI, S.; TOVAR, A. **Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry**. [S.l.: s.n.], 2019. 7–31 p. DOI: [10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9). Citado na página 15.

NASSEHI, A.; NEWMAN, S.; DHOKIA, V.; ZHU, Z.; ASRAI, R. I. Using formal methods to model hybrid manufacturing processes. **Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability**, p. 52–56, 2011. DOI: [10.1007/978-3-642-23860-4-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4-8). Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

NATSUME, M.; SHINMURA, T.; YAMAGUCHI, H. The Effects of Lubricant on the Characteristics of the Magnetic Abrasive Brush in Magnetic Abrasive Finishing. In: . Japan: [s.n.], 2003. p. 397–402. DOI: [10.1299/jsmelem.2003.397](https://doi.org/10.1299/jsmelem.2003.397). Citado na página 62.

NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K. T.; HUI, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, n. December 2017, p. 172–196, 2018. DOI: [10.1016/j.compositesb.2018.02.012](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012). Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 48.

NOYAN, I. C.; COHEN, J. B. **Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation**. 1. ed. New York: Springer Science+Business Media, 1987. 1–286 p. DOI: [10.1007/978-1-4613-9570-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9570-6). Citado na página 100.

NTOUANOGLOU, K.; STAVROPOULOS, P.; MOURTZIS, D. 4D printing prospects for the aerospace industry: A critical review. **Procedia Manufacturing**, v. 18, p. 120–129, 2018. DOI: [10.1016/j.promfg.2018.11.016](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.11.016). Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

PAOLINI, A.; KOLLMANNNSBERGER, S.; RANK, E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. **Additive Manufacturing**, v. 30, 2019. DOI: [10.1016/j.addma.2019.100894](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894). Citado na página 16.

PETRICK, I. J.; SIMPSON, T. W. 3D Printing Disrupts Manufacturing: How Economies of One Create New Rules of Competition. **Research-Technology Management**, v. 56, n. 6, p. 12–16, 2013. DOI: [10.5437/08956308x5606193](https://doi.org/10.5437/08956308x5606193). Citado na página 14.

PEUSTER, M.; HESSE, C.; SCHLOO, T.; FINK, C.; BEERBAUM, P.; SCHNAKENBURG, C. von. Long-term biocompatibility of a corrodible peripheral iron stent in the porcine descending aorta. **Biomaterials**, v. 27, n. 28, p. 4955–4962, 2006. DOI: [10.1016/j.biomaterials.2006.05.029](https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.05.029). Citado na página 41.

PISCOPO, G.; SALMI, A.; ATZENI, E. Influence of High-Productivity Process Parameters on the Surface Quality and Residual Stress State of AISI 316L Components Produced by Directed Energy Deposition. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 30, n. 9, p. 6691–6702, 2021. DOI: [10.1007/s11665-021-05954-3](https://doi.org/10.1007/s11665-021-05954-3). Citado na página 126.

PRAKASH, K. S.; NANCHARAIH, T.; RAO, V. V. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 3873–3882, 2018. DOI: [10.1016/j.matpr.2017.11.642](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642). Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 48.

PRESTON, F. W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines. **J. Soc. Glass Tech.**, v. 11, 1927. Citado na página 77.

PRIARONE, P. C.; RIZZUTI, S.; ROTELLA, G.; SETTINERI, L. Tool wear and surface quality in milling of a gamma-TiAl intermetallic. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1-4, p. 25–33, 2012. DOI: [10.1007/s00170-011-3691-x](https://doi.org/10.1007/s00170-011-3691-x). Citado na página 44.

RAI, A. K.; SRINIVASULU, B.; PAUL, C. P.; SINGH, R.; RAI, S. K.; MISHRA, G. K.; BONTHA, S.; BINDRA, K. S. Development of thick sic coating on thin wall tube of zircaloy-4 using laser based directed energy deposition technique. **Surface and Coatings Technology**, v. 398, 2020. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.126088](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126088). Citado na página 3.

RAMAN, A.; DUBEY, M.; GOUZMAN, I.; GAWALT, E. S. Formation of self-assembled monolayers of alkylphosphonic acid on the native oxide surface of SS316L. **Langmuir**, v. 22, n. 15, p. 6469–6472, 2006. DOI: [10.1021/la060636p](https://doi.org/10.1021/la060636p). Citado na página 42.

RIEDE, M.; KNOLL, M.; WILSNACK, C.; GRUBER, S.; CUBILLO, A. A.; MELZER, C.; BRANDÃO, A.; PAMBAGUIAN, L.; SEIDEL, A.; LOPEZ, E.; BRUECKNER, F.; LEYENS, C. Material characterization of AISI 316L flexure pivot bearings fabricated by additive manufacturing. **Materials**, v. 12, n. 15, 2019. DOI: [10.3390/ma12152426](https://doi.org/10.3390/ma12152426). Citado na página 121.

RIVEROS, R. E.; HANN, J. N.; TAYLOR, C. R.; YAMAGUCHI, H. Nanoscale surface modifications by magnetic field-assisted finishing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 135, n. 5, p. 1–8, 2013. DOI: [10.1115/1.4025190](https://doi.org/10.1115/1.4025190). Citado na página 58.

ROTTY, C.; MANDROYAN, A.; DOCHE, M. L.; HIHN, J. Y. Electropolishing of CuZn brasses and 316L stainless steels: Influence of alloy composition or preparation process (ALM vs. standard method). **Surface and Coatings Technology**, v. 307, p. 125–135, 2016. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2016.08.076](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.076). Citado 3 vezes nas páginas 4, 44 e 47.

RUDENKO, A. **3D Concrete House Printer**. 2020. Disponível em: totalkustom.com. Citado na página 16.

RUIZ, J. E.; CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J. I.; LAMIKIZ, A. Study of the influence of shielding gases on Laser Metal Deposition of Inconel 718 superalloy. **Materials**, v. 11, n. 8, 2018. DOI: [10.3390/ma11081388](https://doi.org/10.3390/ma11081388). Citado na página 54.

SABOORI, A.; AVERSA, A.; MARCHESE, G.; BIAMINO, S.; LOMBARDI, M.; FINO, P. Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 16, 2019. DOI: [10.3390/app9163316](https://doi.org/10.3390/app9163316). Citado 4 vezes nas páginas 3, 17, 23 e 56.

SABOORI, A.; PISCOPO, G.; LAI, M.; SALMI, A.; BIAMINO, S. An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by Directed Energy Deposition. **Materials Science and Engineering A**, v. 780, n. February, p. 139179, 2020. DOI: [10.1016/j.msea.2020.139179](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139179). Citado 2 vezes nas páginas 85 e 126.

- SAMES, W. J.; LIST, F. A.; PANNALA, S.; DEHOFF, R. R.; BABU, S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. **International Materials Reviews**, v. 61, n. 5, p. 315–360, 2016. DOI: [10.1080/09506608.2015.1116649](https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649). Citado na página 24.
- SARATHCHANDRA, D.; S., K. S.; VENKAIAH, N. Functionally graded materials and processing techniques: An art of review. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 10, p. 21328–21334, 2018. DOI: [10.1016/j.matpr.2018.06.536](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.536). Citado na página 20.
- SCHILLMOELLER, S. **25 years of 3D printing at the BMW Group: Pioneers in additive manufacturing methods**. 2015. Disponível em: bmwgroup.com. Citado na página 16.
- SEIFI, M.; GORELIK, M.; WALLER, J.; HRABE, N.; SHAMSAEI, N.; DANIEWICZ, S.; LEWANDOWSKI, J. J. Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification. **JOM**, v. 69, n. 3, p. 439–455, 2017. DOI: [10.1007/s11837-017-2265-2](https://doi.org/10.1007/s11837-017-2265-2). Citado na página 27.
- SHINMURA, T.; TAKAZAWA, K.; HATANO, E.; MATSUNAGA, M.; MATSUO, T. Study on Magnetic Abrasive Finishing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 39, n. 1, p. 325–328, 1990. DOI: [10.1016/S0007-8506\(07\)61064-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61064-6). Citado 2 vezes nas páginas 5 e 58.
- SHUKLA, V. C.; PANDEY, P. M.; DIXIT, U. S.; ROY, A.; SILBERSCHMIDT, V. Modeling of normal force and finishing torque considering shearing and ploughing effects in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process with sintered magnetic abrasive powder. **Wear**, v. 390-391, p. 11–22, 2017. DOI: [10.1016/j.wear.2017.06.017](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.06.017). Citado 2 vezes nas páginas 79 e 81.
- SILBERNAGEL, C. **Additive Manufacturing 101-2: What is directed energy deposition?** 2018. Disponível em: canadamakes.ca. Citado na página 48.
- SIMCHI, A. Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features. **Materials Science and Engineering A**, v. 428, n. 1-2, p. 148–158, 2006. DOI: [10.1016/j.msea.2006.04.117](https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.117). Citado na página 97.
- SIMONS, A. **Method of Polishing Wire-Drawing Dies and Apparatus Therefor**. [S.l.], 1929. US Patent 1,698,458. Citado na página 58.
- SINGAMNENI, S.; LV, Y.; HEWITT, A.; CHALK, R.; THOMAS, W.; JORDISON, D. Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review. **Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering**, v. 08, n. 01, 2019. DOI: [10.35248/2168-9792.19.8.215](https://doi.org/10.35248/2168-9792.19.8.215). Citado 2 vezes nas páginas 15 e 33.
- SINGH, D. K.; JAIN, V. K.; RAGHURAM, V. Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 30, n. 7-8, p. 652–662, 2006. DOI: [10.1007/s00170-005-0118-6](https://doi.org/10.1007/s00170-005-0118-6). Citado na página 72.
- SINGH, L.; KHANGURA, S. S.; MISHRA, P. S. Performance of abrasives used in magnetically assisted finishing: A state of the art review. **International Journal of Abrasive Technology**, v. 3, n. 3, p. 215–227, 2010. DOI: [10.1504/IJAT.2010.034052](https://doi.org/10.1504/IJAT.2010.034052). Citado na página 61.
- SINGH, S.; RAMAKRISHNA, S. Biomedical applications of additive manufacturing: Present and future. **Current Opinion in Biomedical Engineering**, v. 2, p. 105–115, 2017. DOI: [10.1016/j.cobme.2017.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cobme.2017.05.006). Citado na página 41.

SIVAKUMAR, M.; Kumar Dhanadurai, K. S.; RAJESWARI, S.; THULASIRAMAN, V. Failures in stainless steel orthopaedic implant devices: A survey. **Journal of Materials Science Letters**, v. 14, n. 5, p. 351–354, 1995. DOI: [10.1007/BF00592147](https://doi.org/10.1007/BF00592147). Citado na página 41.

SONG, M.; WANG, M.; LOU, X.; REBAK, R. B.; WAS, G. S. Radiation damage and irradiation-assisted stress corrosion cracking of additively manufactured 316L stainless steels. **Journal of Nuclear Materials**, v. 513, p. 33–44, 2019. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2018.10.044](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.10.044). Citado na página 41.

SOSHI, M.; RING, J.; YOUNG, C.; ODA, Y.; MORI, M. Innovative grid molding and cooling using an additive and subtractive hybrid CNC machine tool. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 1, p. 401–404, 2017. DOI: [10.1016/j.cirp.2017.04.093](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.093). Citado 2 vezes nas páginas 17 e 56.

SPIERINGS, A. B.; STARR, T. L.; WEGENER, K. Fatigue performance of additive manufactured metallic parts. **Rapid Prototyping Journal**, v. 19, n. 2, p. 88–94, 2013. DOI: [10.1108/13552541311302932](https://doi.org/10.1108/13552541311302932). Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.

SREEKANTH, S.; GHASSEMALI, E.; HURTIG, K.; JOSHI, S. Effect of Direct Energy Deposition Process Parameters on Single-Track Deposits of Alloy 718. **Metals**, v. 10, n. 1, p. 96, 2020. DOI: [10.3390/met10010096](https://doi.org/10.3390/met10010096). Citado 2 vezes nas páginas 24 e 54.

SRIVASTAVA, A. K.; PAVEL, R. Grinding investigations of Ti-6Al-4V parts produced using direct metal laser sintering technology. **International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems**, v. 8, n. 5/6, p. 223, 2015. DOI: [10.1504/ijmms.2015.073566](https://doi.org/10.1504/ijmms.2015.073566). Citado na página 45.

STÅHL, J. E.; SCHULTHEISS, F. Analytical calculation of the true equivalent chip thickness for cutting tools and its influence on the calculated tool life. **Advanced Materials Research**, v. 576, p. 80–86, 2012. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.576.80](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.576.80). Citado na página 98.

STANO, G.; Di Nisio, A.; LANZOLLA, A.; PERCOCO, G. Additive manufacturing and characterization of a load cell with embedded strain gauges. **Precision Engineering**, v. 62, p. 113–120, 2019. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2019.11.019](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.11.019). Citado na página 17.

SUGAVANESWARAN, M.; JEBARAJ, A. V.; KUMAR, M. D.; LOKESH, K.; RAJAN, A. J. Enhancement of surface characteristics of direct metal laser sintered stainless steel 316L by shot peening. **Surfaces and Interfaces**, v. 12, n. May, p. 31–40, 2018. DOI: [10.1016/j.surfin.2018.04.010](https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.04.010). Citado 3 vezes nas páginas 4, 44 e 46.

SUNDGREN, J. E.; BODÖ, P.; LUNDSTRÖM, I.; BERGGREN, A.; HELLEM, S. Auger electron spectroscopic studies of stainless-steel implants. **Journal of Biomedical Materials Research**, v. 19, n. 6, p. 663–671, 1985. DOI: [10.1002/jbm.820190606](https://doi.org/10.1002/jbm.820190606). Citado na página 41.

SVETLIZKY, D.; DAS, M.; ZHENG, B.; VYATSKIKH, A. L.; BOSE, S.; BANDYOPADHYAY, A.; SCHOENUNG, J. M.; LAVERNIA, E. J.; ELIAZ, N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. **Materials Today**, v. 49, p. 271–295, 2021. DOI: [10.1016/j.mattod.2021.03.020](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020). Citado na página 3.

TALHA, M.; BEHERA, C. K.; SINHA, O. P. A review on nickel-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications. **Materials Science and Engineering C**, v. 33, n. 7, p. 3563–3575, 2013. DOI: [10.1016/j.msec.2013.06.002](https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.06.002). Citado na página 42.

TAMINGER, K. M. B.; HAFLEY, R. A.; FAHRINGER, D. T.; MARTIN, R. E. Effect of Surface Treatments on Electron Beam Freeform Fabricated Aluminum Structures. **International Solid Freeform Fabrication Symposium**, 2004. DOI: [10.26153/tsw/7012](https://doi.org/10.26153/tsw/7012). Citado na página 44.

TAPIA, G.; ELWANY, A. A Review on Process Monitoring and Control in Metal-Based Additive Manufacturing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 136, n. 6, 2014. DOI: [10.1115/1.4028540](https://doi.org/10.1115/1.4028540). Citado na página 28.

TENG, X.; ZHANG, G.; ZHAO, Y.; CUI, Y.; LI, L.; JIANG, L. Study on magnetic abrasive finishing of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 5-6, p. 2513–2521, 2019. DOI: [10.1007/s00170-019-04485-5](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04485-5). Citado 2 vezes nas páginas 45 e 70.

TERRASSA, K. L.; HALEY, J. C.; MACDONALD, B. E.; SCHOENUNG, J. M. Reuse of powder feedstock for directed energy deposition. **Powder Technology**, v. 338, p. 819–829, 2018. DOI: [10.1016/j.powtec.2018.07.065](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.065). Citado na página 23.

THOMPSON, M. K.; MORONI, G.; VANEKER, T.; FADEL, G.; CAMPBELL, R. I.; GIBSON, I.; BERNARD, A.; SCHULZ, J.; GRAF, P.; AHUJA, B.; MARTINA, F. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 2, p. 737–760, 2016. DOI: [10.1016/j.cirp.2016.05.004](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004). Citado 6 vezes nas páginas 2, 16, 18, 29, 30 e 31.

THOMPSON, S. M.; BIAN, L.; SHAMSAEI, N.; YADOLLAHI, A. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. **Additive Manufacturing**, v. 8, p. 36–62, 2015. DOI: [10.1016/j.addma.2015.07.001](https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.001). Citado 7 vezes nas páginas 3, 48, 49, 50, 51, 55 e 56.

TOFAIL, S. A.; KOUMOULOS, E. P.; BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S.; O'DONOGHUE, L.; CHARITIDIS, C. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. **Materials Today**, v. 21, n. 1, p. 22–37, 2018. DOI: [10.1016/j.mattod.2017.07.001](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001). Citado 6 vezes nas páginas 15, 17, 18, 23, 27 e 28.

TOWNSEND, A.; SENIN, N.; BLUNT, L.; LEACH, R. K.; TAYLOR, J. S. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. **Precision Engineering**, v. 46, p. 34–47, 2016. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2016.06.001](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001). Citado na página 27.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Woburn: Butterworth–Heinemann, 2014. 1-464 p. Citado 3 vezes nas páginas 4, 112 e 113.

TRIVEDI, M.; JEE, J.; SILVA, S.; BLOMGREN, C.; PONTINHA, V. M.; DIXON, D. L.; Van Tassel, B.; BORTNER, M. J.; WILLIAMS, C.; GILMER, E.; HARING, A. P.; HALPER, J.; JOHNSON, B. N.; KONG, Z.; HALQUIST, M. S.; ROCHELEAU, P. F.; LONG, T. E.; ROPER, T.; WIJESINGHE, D. S. Additive manufacturing of pharmaceuticals for precision medicine applications: A review of the promises and perils in implementation. **Additive Manufacturing**, v. 23, p. 319–328, 2018. DOI: [10.1016/j.addma.2018.07.004](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.004). Citado 2 vezes nas páginas 16 e 19.

TUTESKI, O.; KOČOV, A. Mold design and production by using additive manufacturing (AM) - Present status and future perspectives. **International Scientific Journal “Industry 4.0”**, v. 3, n. 2, p. 82–85, 2018. Citado na página 17.

TYAGI, P.; GOULET, T.; RISO, C.; STEPHENSON, R.; CHUENPRATEEP, N.; SCHLITZER, J.; BENTON, C.; GARCIA-MORENO, F. Reducing the roughness of internal surface of an additive manufacturing produced 316 steel component by chempolishing and electropolishing. **Additive Manufacturing**, v. 25, p. 32–38, 2019. DOI: [10.1016/j.addma.2018.11.001](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.001). Citado 3 vezes nas páginas 4, 44 e 47.

VALLABANI, N. V.; ALIJAGIC, A.; PERSSON, A.; ODNEVALL, I.; SÄRNDAHL, E.; KARLSSON, H. L. Toxicity evaluation of particles formed during 3D-printing: Cytotoxic, genotoxic, and inflammatory response in lung and macrophage models. **Toxicology**, v. 467, p. 153100, 2022. DOI: [10.1016/j.tox.2022.153100](https://doi.org/10.1016/j.tox.2022.153100). Citado na página 24.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2017. Citado na página 37.

WAHLSTRÖM, T.; SAHLSTRÖM, J. **Additive Manufacturing in Production For the Automotive Industry**. Dissertação (mathesis) — Faculty of Engineering LTH, LUND University, 2016. Citado na página 16.

WALCZAK, J.; SHAHGALDI, F.; HEATLEY, F. In vivo corrosion of 316L stainless-steel hip implants: Morphology and elemental compositions of corrosion products. **Biomaterials**, v. 19, n. 1-3, p. 229–237, 1998. DOI: [10.1016/S0142-9612\(97\)00208-1](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(97)00208-1). Citado na página 41.

WANG, B.; CASTELLANA, J.; MELKOTE, S. N. A hybrid post-processing method for improving the surface quality of additively manufactured metal parts. **CIRP Annals**, v. 70, n. 1, p. 175–178, 2021. DOI: [10.1016/j.cirp.2021.03.010](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.03.010). Citado 2 vezes nas páginas 4 e 44.

WANG, Y.; HU, D. Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 1, p. 43–49, 2005. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2004.06.014](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.06.014). Citado na página 58.

WEGENER, K.; HOFFMEISTER, H. W.; KARPUSCHEWSKI, B.; KUSTER, F.; HAHMANN, W. C.; RABIEY, M. Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 757–777, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611002058>. Citado na página 46.

WILSON, J. **Fundamental Biomaterials: Metals**. In: _____. United Kingdom: Woodhead Publishing - Elsevier, 2018. cap. Chapter 1 - Metallic biomaterials: State of the art and new challenges, p. 1–33. DOI: [10.1016/B978-0-08-102205-4.00001-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102205-4.00001-5). Citado na página 42.

WOŁOSZ, P.; BARAN, A.; POLAŃSKI, M. The influence of laser engineered net shaping (LENS™) technological parameters on the laser deposition efficiency and properties of H13 (AISI) steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 823, 2020. DOI: [10.1016/j.jallcom.2020.153840](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153840). Citado na página 53.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A Review of Additive Manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, v. 2012, p. 1–10, 2012. DOI: [10.5402/2012/208760](https://doi.org/10.5402/2012/208760). Citado na página 48.

WORLD, A. **Audi Toolmaking prints “Auto Union Typ C”**. 2005. Disponível em: automotiveworld.com. Citado na página 16.

WU, J.; YIN, S.; XING, B.; ZOU, Y. Effect of magnetic pole on finishing characteristics in low-frequency alternating magnetic field for micro-groove surface. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 9-12, p. 4745–4755, 2019. DOI: [10.1007/s00170-019-04362-1](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04362-1). Citado 2 vezes nas páginas 62 e 63.

- WU, P. Y.; HIRTLER, M.; BAMBACH, M.; YAMAGUCHI, H. Effects of build- and scan-directions on magnetic field-assisted finishing of 316L stainless steel disks produced with selective laser melting. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 31, p. 583–594, 2020. DOI: [10.1016/j.cirpj.2020.08.010](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.010). Citado 4 vezes nas páginas 43, 47, 66 e 68.
- WU, P. Y.; YAMAGUCHI, H. Material Removal Mechanism of Additively Manufactured Components Finished using Magnetic Abrasive Finishing. **Procedia Manufacturing**, v. 26, p. 394–402, 2018. DOI: [10.1016/j.promfg.2018.07.047](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.047). Citado 3 vezes nas páginas 44, 65 e 68.
- XU, J.; GU, X.; DING, D.; PAN, Z.; CHEN, K. A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24, n. 6, p. 1012–1025, 2018. DOI: [10.1108/RPJ-10-2017-0196](https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0196). Citado na página 36.
- YAMAGUCHI, H.; FERGANI, O.; WU, P. Y. Modification using magnetic field-assisted finishing of the surface roughness and residual stress of additively manufactured components. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 1, p. 305–308, 2017. DOI: [10.1016/j.cirp.2017.04.084](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.084). Citado 9 vezes nas páginas 4, 43, 47, 65, 68, 91, 110, 123 e 127.
- YAMAGUCHI, H.; NTEZIYAREMYE, V.; STEIN, M.; LI, W. Hybrid tool with both fixed-abrasive and loose-abrasive phases. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 1, p. 337–340, 2015. DOI: [10.1016/j.cirp.2015.04.006](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.006). Citado na página 60.
- YAMAGUCHI, H.; SHINMURA, T.; IKEDA, R. Study of internal finishing of austenitic stainless steel capillary tubes by magnetic abrasive finishing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME**, v. 129, n. 5, p. 885–892, 2007. DOI: [10.1115/1.2738957](https://doi.org/10.1115/1.2738957). Citado na página 59.
- YAMAGUCHI, H.; SRIVASTAVA, A. K.; TAN, M. A.; RIVEROS, R. E.; HASHIMOTO, F. Magnetic abrasive finishing of cutting tools for machining of titanium alloys. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 311–314, 2012. DOI: [10.1016/j.cirp.2012.03.066](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.066). Citado na página 58.
- YAMAZAKI, T. Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining. **Procedia CIRP**, v. 42, p. 81–86, 2016. DOI: [10.1016/j.procir.2016.02.193](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.193). Citado na página 3.
- YANG, S.; LI, W. **Surface finishing theory and new technology**. 1. ed. Beijing: National Defense Industry Press and Springer-Verlag GmbH Germany, 2018. 1–497 p. Citado 7 vezes nas páginas 4, 59, 60, 61, 62, 71 e 72.
- YAZDANPANA, A.; LAGO, M.; GENNARI, C.; DABALÀ, M. Stress corrosion cracking probability of selective laser melted 316L austenitic stainless steel under the effect of grinding induced residual stresses. **Metals**, v. 11, n. 2, p. 1–20, 2021. DOI: [10.3390/met11020327](https://doi.org/10.3390/met11020327). Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.
- YU, J.; ROMBOUTS, M.; MAES, G. Cracking behavior and mechanical properties of austenitic stainless steel parts produced by laser metal deposition. **Materials and Design**, v. 45, p. 228–235, 2013. DOI: [10.1016/j.matdes.2012.08.078](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.078). Citado na página 126.
- YUSUF, S. M.; CUTLER, S.; GAO, N. Review: The impact of metal additive manufacturing on the aerospace industry. **Metals**, v. 9, n. 12, 2019. DOI: [10.3390/met9121286](https://doi.org/10.3390/met9121286). Citado na página 15.

ZELINKO, A.; WELZEL, F.; BIERMANN, D.; MAIBORODA, V. Tool type and macrostructure for magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools. **Production Engineering**, n. 1–11, 2022. DOI: [10.1007/s11740-021-01097-5](https://doi.org/10.1007/s11740-021-01097-5). Citado 2 vezes nas páginas 62 e 63.

ZHANG, C.; CHEN, F.; HUANG, Z.; JIA, M.; CHEN, G.; YE, Y.; LIN, Y.; LIU, W.; CHEN, B.; SHEN, Q.; ZHANG, L.; LAVERNIA, E. J. Additive manufacturing of functionally graded materials: A review. **Materials Science and Engineering A**, v. 764, p. 138209, 2019. DOI: [10.1016/j.msea.2019.138209](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209). Citado 5 vezes nas páginas 20, 68, 75, 76 e 78.

ZHANG, J.; CHAUDHARI, A.; WANG, H. Surface quality and material removal in magnetic abrasive finishing of selective laser melted 316L stainless steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 45, p. 710–719, 2019. DOI: [10.1016/j.jmapro.2019.07.044](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.044). Citado 3 vezes nas páginas 44, 65 e 81.

ZHANG, J.; TAI, W. G.; WANG, H.; KUMAR, A. S.; LU, W. F.; FUH, J. Y. H. Magnetic abrasive polishing of additively manufactured 316L stainless steel parts. In: **European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Conference Proceedings - 18th International Conference and Exhibition, EUSPEN 2018**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 401–402. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 68.

ZHANG, J.; WANG, H. Magnetically driven internal finishing of AISI 316L stainless steel tubes generated by laser powder bed fusion. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 76, n. February, p. 155–166, 2022. DOI: [10.1016/j.jmapro.2022.02.009](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.009). Citado 4 vezes nas páginas 44, 47, 66 e 68.

ZHANG, J.; WANG, H.; Senthil Kumar, A.; JIN, M. Experimental and theoretical study of internal finishing by a novel magnetically driven polishing tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 153, p. 103552, 2020. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2020.103552](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103552). Citado na página 66.

ZHANG, L. C.; SUTO, T.; NOGUCHI, H.; WAIDA, T. An overview of applied mechanics in grinding. **Manufacturing Review**, v. 5, n. 4, p. 261–273, 1992. precision-manufacturing.unsw.edu.au. Citado na página 127.

ZHAO, Y.; RATAY, J.; LI, K.; YAMAGUCHI, H.; XIONG, W. Effects of Magnetic Abrasive Finishing on Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718 Processed by Laser Powder Bed Fusion. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 6, n. 2, 2022. DOI: [10.3390/jmmp6020043](https://doi.org/10.3390/jmmp6020043). Citado na página 71.

ZHAO, Y.; SUN, J.; LI, J.; WANG, P.; ZHENG, Z.; CHEN, J.; YAN, Y. The stress coupling mechanism of laser additive and milling subtractive for FeCr alloy made by additive –subtractive composite manufacturing. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 769, p. 898–905, 2018. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.08.079](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.079). Citado na página 45.

ZHENG, B.; ZHOU, Y.; SMUGERESKY, J. E.; SCHOENUNG, J. M.; LAVERNIA, E. J. Thermal behavior and microstructural evolution during laser deposition with laser-engineered net shaping: Part I. Numerical calculations. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 39, n. 9, p. 2228–2236, 2008. DOI: [10.1007/s11661-008-9557-7](https://doi.org/10.1007/s11661-008-9557-7). Citado 2 vezes nas páginas 125 e 126.

ZHOU, Y.; HUANG, W. M.; KANG, S. F.; WU, X. L.; LU, H. B.; FU, J.; CUI, H. From 3D to 4D printing: approaches and typical applications. **Journal of Mechanical Science and Technology**,

v. 29, n. 10, p. 4281–4288, 2015. DOI: [10.1007/s12206-015-0925-0](https://doi.org/10.1007/s12206-015-0925-0). Citado 2 vezes nas páginas 3 e 21.

ZHU, P.; ZHANG, G.; TENG, X.; DU, J.; JIANG, L.; CHEN, H.; LIU, N. Investigation and process optimization for magnetic abrasive finishing additive manufacturing samples with different forming angles. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 118, n. 7-8, p. 2355–2371, 2022. DOI: [10.1007/s00170-021-08083-2](https://doi.org/10.1007/s00170-021-08083-2). Citado na página 70.

ZOU, Y.; XIE, H.; ZHANG, Y. Study on surface quality improvement of the plane magnetic abrasive finishing process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 109, n. 7-8, p. 1825–1839, 2020. DOI: [10.1007/s00170-020-05759-z](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05759-z). Citado 3 vezes nas páginas 62, 63 e 116.