

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

**Estudo da usinagem de peças impressas por
manufatura aditiva a arco, com foco no
acabamento**

Por

Carlos Toshio Araki Ávila

Brasília, 27 de setembro de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

Estudo da usinagem de peças impressas por manufatura aditiva a arco, com foco no acabamento

Por

Carlos Toshiro Araki Ávila

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Profa. Déborah de Oliveira UnB/ENM
Prof. Maksym Ziberov UnB/ENM
Prof. Guilherme Caribe De Carvalho UnB/ENM

Brasília 27 de setembro de 2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ávila, Carlos
?e Estudo da usinagem de peças impressas por manufatura
aditiva a arco, com foco no acabamento / Carlos Ávila;
orientador Déborah de Oliveira. -- Brasília, 2022.
97 p.

Monografia (Graduação - Engenharia mecânica) --
Universidade de Brasília, 2022.

1. Manufatura Aditiva. 2. MADA. 3. Usinagem. 4.
Fresamento. 5. Acabamento Superficial. I. de Oliveira,
Déborah, orient. II. Título.

Agradecimentos

Agradeço principalmente aos meus pais por todas as oportunidades que me deram na vida, pela paciência que tiveram comigo, muita paciência mesmo, pelo carinho e pela saúde. Aos familiares e amigos que me apoiaram durante todo esse período de faculdade.

Agradeço a Universidade de Brasília, a Faculdade de Tecnologia e ao Departamento de Engenharia Mecânica e aos laboratórios da UnB pelo aprendizado na área de formação.

Aos professores do departamento, principalmente a minha orientadora, professora Déborah de Oliveira e ao professor Maksym Ziberov. Agradeço também ao professor Taygoara Felamingo de Oliveira pela imensa ajuda que me deu no começo e inclusive antes do começo da faculdade.

Agradeço a TECMEC, Empresa Júnior de engenharia mecânica da UnB pela oportunidade de aprender e atuar em áreas que nunca tinha atuado, em fazer novas amizades que fizeram a formação mais divertida.

Resumo

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é um processo de manufatura onde a peça é produzida por meio de deposições sucessivas de camadas produzidas por um arame sobre um substrato, formando a geometria final da peça. Uma peça produzida por MADA possui acabamento superficial irregular, sendo necessário passar por um pós-processamento, geralmente obtido por usinagem. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da velocidade de corte no acabamento superficial desse tipo de material. Dentre os processos de usinagem, de forma mais específica, este projeto avaliou a influência da velocidade de corte no processo de fresamento tangencial na superfície de uma peça produzida por MADA com o arame ER70S-6. Foi utilizado uma fresa de aço rápido de quatro arestas com cinco milímetros de diâmetro e sem revestimento. Se realizaram cinco ensaios variando a velocidade de corte entre 10 e 50 m/min e uma réplica para cada condição de ensaio, mantendo constante o avanço por dente em 0,025 mm e a profundidade de corte de 0,5 mm, o fresamento foi realizado utilizando o fluido de corte sintético BIO100E na diluição de 1:9, aplicado pelo método convencional com uma vazão de 346 l/h, para evitar danos térmicos na peça. Para a avaliação da qualidade superficial da peça, analisou-se a rugosidade superficial, a dureza e imagens da superfície usinada. Para a análise da rugosidade teve-se em conta a Norma ABNT NBR ISO 4287 para a obtenção de dados e para o ensaio de dureza teve-se em conta a Norma ASTM E 10. Após os ensaios, a obtenção de dados e a análise dos resultados, conclui-se que a velocidade de corte de 10 m/min foi a produziu um melhor acabamento superficial na peça e a velocidade de corte de 40 m/min foi a velocidade de corte que produziu um pior acabamento superficial na peça. Concluindo ainda que, diferentemente do esperado na literatura, uma menor velocidade de corte produziu um melhor acabamento superficial na peça.

Palavras-chaves: Manufatura Aditiva, MADA, Usinagem, Fresamento, Acabamento Superficial.

Abstract

Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a manufacturing process where the part is produced through successive depositions of layers produced by a wire on a substrate, forming the final geometry of the part. A part produced by WAAM has an irregular surface finish, requiring post-processing, usually obtained by machining. This work aimed to evaluate the influence of cutting speed on the surface finish of this type of material. Among the machining processes, more specifically, this project evaluated the influence of cutting speed in the tangential milling process on the surface of a part produced by MADA with ER70S-6 wire. A five millimeter diameter, uncoated, four-edged high-speed steel milling cutter was used. Five tests were carried out, varying the cutting speed between 10 and 50 m/min and a replica for each test condition, keeping the feed per tooth constant at 0.025 mm and the cutting depth of 0.5 mm, milling was performed using synthetic cutting fluid BIO100E in a 1:9 dilution, applied by the conventional method with a flow rate of 346 l/h, to avoid thermal damage to the part. To evaluate the surface quality of the part, the surface roughness, hardness and images of the machined surface were analyzed. For the roughness analysis, the ABNT NBR ISO 4287 Standard was taken into account to obtain data and for the hardness test, the ASTM E 10 Standard was taken into account. After the tests, data collection and analysis of the results, it is concluded that the cutting speed of 10 m/min was the one that produced a better surface finish on the part and the cutting speed of 40 m/min was the cutting speed that produced a worse surface finish on the part. Concluding that, differently from what was expected in the literature, a lower cutting speed produced a better surface finish on the part.

Key-words: Additive Manufacturing, WAAM, Machining, Milling, Surface Finishing.

Lista de Figuras

Figura 1 – Adoção industrial da manufatura aditiva (Adaptado de Vafadar et al., 2021)	1
Figura 2 – MA com chocolate, barra de escala de 1 cm. Fonte: (KARYAPPA; HASHIMOTO, 2019)	2
Figura 3 – Obra de arte - "The Butterfly Screen". Fonte: (MX3D, 2022a).	2
Figura 4 – Obra de arte - "Oregon Dragon Bench". Fonte: (MX3D, 2022b)	3
Figura 5 – Peças de reposição fabricadas por manufatura aditiva. Fonte: (a) e (b) (MX3D, 2022c)	3
Figura 6 – a) e b) - Peças obtidas por MA com o arame ER70S-6. Fonte: (CERVANTES et al., 2019)	4
Figura 7 – a) e b) - Peças obtidas por MA com o arame ER70S-6 após um processo de usinagem. Fonte: (CERVANTES et al., 2019)	4
Figura 8 – Peça produzida por MADA e usinada para obter o acabamento final. Fonte: (3DPRINTING, 2021)	5
Figura 9 – Esquema genérico do processo MADA. Fonte: (VIMAL; SRINIVAS; RAJAK, 2021)	8
Figura 10 – Ilustração do processo MADA. Fonte: Adaptado de (MCANDREW et al., 2018)	9
Figura 11 – Tipos de poros que aparecem em peças fabricadas por MA a base de laser: (A) Porosidade de gas aprisionado; (B) Porosidade induzida por fusão incompleta; (C) Falta de fusão com partículas não derretidas dentro de grandes poros irregulares; (D) Fissuras. Fonte: (SOLA; NOURI, 2019)	11
Figura 12 – Layout dos testes. Fonte: adaptado do (ZHANG et al., 2019)	12
Figura 13 – Exemplo da remoção de material no fresamento. Fonte: (VALLE et al., 2001)	13
Figura 14 – Fresamento tangencial concordante (a) e fresamento tangencial discordante (b). Fonte: (SANDIVIK, 2022a)	15
Figura 15 – Modos de fresamento. Fresamento tangencial (a) e fresamento de topo (b) . Fonte: (GROOVER, 2000), p. 387	15

Figura 16 – Modelo dinâmico da superfície produzida por fresamento. Fonte: (MACEDO, 2001)	16
Figura 17 – Fatores de influência sobre a força de usinagem. Fonte: (BLÖDORN et al., 2014)	17
Figura 18 – Influência do número de dentes da fresa quando aplica uma força. Fonte: (MACEDO, 2001)	17
Figura 19 – Forças de usinagem em fresamento tangencial e suas componentes na operação de fresamento. Fonte: (FERRARESI, 2018), p. 157	18
Figura 20 – Esquema da MADA e usinagem adaptado do Lopes et al. (2020).	19
Figura 21 – Profundidade de corte radial e axial. Fonte: (SANDIVIK, 2022b)	21
Figura 22 – Características e aplicações de fresas de topo com diferentes números de corte Fonte: (MITSUBISHI, 2022)	21
Figura 23 – Comparação da seção do bolsão de cavacos. Fonte: (MITSUBISHI, 2022)	21
Figura 24 – Parâmetros de rugosidade. Fonte: (VACARO, 2014)	23
Figura 25 – Alguns parâmetros de rugosidade. Fonte: (MACHADO et al., 2009), p. 281	24
Figura 26 – Relação entre a dureza e o limite de tração no aço. Fonte: (AGGEN FRANK W. AKSTENS et al., 1990)	25
Figura 27 – Exemplo da peça antes (a) e depois (b) de serem usinadas. Fonte: (DVORAK et al., 2021)	26
Figura 28 – Exemplo da peça no programa (a) e Exemplo do passo da fresadora no programa(b). Fonte: (DVORAK et al., 2021)	27
Figura 29 – Acabamento superficial por jateamento (a), acabamento vibratório (b), acabamento com polimento (c), acabamento centrífugo (d), acabamento com nitrito preto (e) e jateamento de granalhas (f). Fonte: (3DEO, 2022)	28
Figura 30 – Peça produzida por MADA e usinada por fresamento para obter o acabamento final. Fonte: (3DPRINTING, 2021)	29
Figura 31 – Manufatura e usinagem de uma peça de argila . Fonte: (3DPRINTING, 2021)	29
Figura 32 – Fluxograma do experimento de Dttmann e Gomes (2021)	30
Figura 33 – Sequência de passes do experimento, adaptado de Dttmann e Gomes (2021)	30
Figura 34 – Peça deformada produzida por Dttmann e Gomes (2021)	31
Figura 35 – Formatos de parede depositada, adaptado de Adebayo (2013)	32
Figura 36 – Fluxograma das atividades.	34
Figura 37 – Robô cartesiano MAXR23R-S42-H42-C42. Fonte: (ELECTRIC, 2009)	35
Figura 38 – Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT. Fonte: Adaptado de (FRONIUS, 2022)	36
Figura 39 – Peça a ser estudada, produzida por Novelino (2021). Fonte: Adaptado de (BARRETO, 2022)	36
Figura 40 – Fresa de topo aço rápido Vonder HSS 5.0.	37

Figura 41 – Fresadora CNC Franho FM500.	37
Figura 42 – Franho FM500. Fonte: (FRANHO, 2022)	38
Figura 43 – Seção de corte entre o substrato e a peça.	38
Figura 44 – Representação esquemática do processo de separação parede-substrato. Fonte: (PIMENTA, 2022)	39
Figura 45 – Representação do processo de usinagem da peça na fresadora CNC. . .	39
Figura 46 – Esquema da peça na fresadora	40
Figura 47 – Peça do estudo usinada	41
Figura 48 – Microscópio a ser utilizado. Fonte:(OLYMPUS, 2022)	41
Figura 49 – Esquema do processo de obtenção de dados da rugosidade com o rugo- símetro	42
Figura 50 – Durômetro Zwick Roell ZHU250. Fonte: (ZWICK/ROELL, 2022) . . .	43
Figura 51 – Orientação da peça	45
Figura 52 – a) Canal 1 e b) Canal 6 ($V_c = 10$ m/min)	46
Figura 53 – Imperfeições formadas por movimento concordante no canal 1 ($V_c = 10$ m/min)	47
Figura 54 – a) Canal 2 e b) Canal 7 ($V_c = 20$ m/min)	48
Figura 55 – Canal 2 a) Parte do canal formado por movimento discordante e b) Parte do canal formado por movimento concordante com sinalização nas imperfeições	48
Figura 56 – a) Canal 3 e b) Canal 8 ($V_c = 30$ m/min)	49
Figura 57 – Canal 3 a) Parte do canal formado por movimento discordante e b) Parte do canal formado por movimento concordante com sinalização nas imperfeições	49
Figura 58 – a) Canal 4 e b) Canal 9 ($V_c = 40$ m/min)	50
Figura 59 – Canal 4 a) Parte do canal formado por movimento discordante e b) Parte do canal formado por movimento concordante com sinalização nas imperfeições	51
Figura 60 – a) Canal 5 e b) Canal 10 ($V_c = 50$ m/min)	52
Figura 61 – Canal 5 a) Parte do canal formado por movimento discordante e b) Parte do canal formado por movimento concordante com sinalização nas imperfeições	52
Figura 62 – Comparativa entre os dez canais e o desvio aritmético médio (R_a) . . .	56
Figura 63 – Comparativa entre os dez canais e a altura média do perfil (R_z)	56
Figura 64 – Comparativa entre os dez canais e desvio médio quadrático (R_q)	57
Figura 65 – Superfície de referência	57
Figura 66 – Comparativa da dureza entre os dez canais	59
Figura 67 – Resultado da medição da rugosidade nos ensaios	71
Figura 68 – Resultado da medição da rugosidade nas réplicas	72

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do CMT, MIG/MAG e TIG. Fonte: Adaptado do (IMOUDU; AYELE; BARABADI, 2017)	10
Tabela 2 – Composição química típica do arame ER70S-6. Fonte: (BOHLER, 2022)	35
Tabela 3 – Parâmetros médios para a obtenção da peça de estudo com deposição bidirecional a arco contínuo. Fonte: (NOVELINO, 2021)	35
Tabela 4 – Características da fresa de topo. Fonte: (VONDER, 2022)	37
Tabela 5 – Parâmetros de entrada utilizados nos ensaios de fresamento de topo . .	40
Tabela 6 – Representação do processo de usinagem da peça na fresadora CNC. . .	40
Tabela 7 – Definições do teste de dureza	44
Tabela 8 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 1 e canal 6 ($V_c = 10$ m/min)	47
Tabela 9 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 2 e canal 7 ($V_c = 20$ m/min)	48
Tabela 10 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 3 e canal 8 ($V_c = 30$ m/min)	49
Tabela 11 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 4 e canal 9 ($V_c = 40$ m/min)	50
Tabela 12 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 5 e canal 10 ($V_c = 50$ m/min)	52
Tabela 13 – Valores obtidos para R_a , R_z e R_q	54
Tabela 14 – Valores da réplica obtidos para R_a , R_z e R_q	55
Tabela 15 – Valores de dureza obtido em cada canal	58

Lista de abreviaturas e siglas

<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CMT</i>	<i>Cold Metal Transfer</i>
<i>CNC</i>	Controle Numérico Computadorizado
<i>DP</i>	Desvio padrão
<i>GMAW</i>	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
<i>GTAW</i>	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
<i>MA</i>	Manufatura Aditiva
<i>MADA</i>	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
<i>MAG</i>	<i>Metal Active Gas</i>
<i>MIG</i>	<i>Metal Inert Gas</i>
<i>STL</i>	<i>Standard Tessellation Language</i>
<i>WAAM</i>	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>

Lista de símbolos

a_e	Profundidade de Corte Radial
a_p	Profundidade de Corte Axial
Ar	Argônio
CO_2	Dióxido de Carbono
F_{a_p}	Força de Apoio
F_c	Força de Corte
F_e	Força Efetiva
F_f	Força de Avanço
F_p	Força Passiva
F_t	Força Ativa
F_u	Força de Usinagem
f_z	Avanço por dente
HB	Dureza Brinell
l_n	Comprimento de Avaliação
l_r	Comprimento de Amostragem, " <i>cut-off</i> "
n	Número de repetições
R_a	Desvio Aritmético Médio
R_{a_d}	Desvio Aritmético Médio no sentido de corte discordante
R_{a_c}	Desvio Aritmético Médio no sentido de corte concordante
R_{k_u}	Fator de Achatamento do Perfil
R_q	Desvio Médio Quadrático

R_{s_k}	Fator de Assimetria do Perfil
R_t	Altura Total do Perfil
R_z	Altura Média do Perfil
V_c	Velocidade de Corte
V_f	Velocidade de Avanço

Sumário

	1 INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	5
1.2	Objetivo	6
	2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Manufatura aditiva	7
2.2	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco	8
2.2.1	Características mecânicas das peças feitas por manufatura aditiva	10
2.3	Fresamento	13
2.3.1	Tipos fundamentais de fresamento	14
2.3.2	Vibrações no fresamento	15
2.4	Forças no fresamento	16
2.5	Influência dos principais parâmetros de corte na qualidade da peça no fresamento	18
2.5.1	Rugosidade	22
2.5.2	Principais parâmetros da rugosidade	23
2.5.3	Dureza	24
2.5.3.1	Ensaio de dureza Brinell	25
2.6	Usinagem de peças impressas	26
2.6.1	Peça usinada por fresamento tangencial	26
2.6.2	Acabamento superficial em peças impressas	27
2.6.3	Usinagem em escala industrial	28
2.6.4	Usinabilidade em peça produzida por MADA (GMAW e ER70S-6) com ferro fundido nodular	29
2.6.5	Caracterização da integração entre a MADA e o processo de usinagem	31
2.6.6	Análise no processo de usinagem para a liga de titânio Ti6Al-4V fabricado por MADA	33
	3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Metodologia	34

3.2	Equipamentos e consumíveis	34
3.3	Metodologia de preparação da peça	38
3.4	Usinagem da peça e parâmetros de corte	39
3.5	Análise superficial	41
3.5.1	Rugosidade	42
3.5.2	Dureza	43
	4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Análise superficial	46
	5 CONCLUSÃO	60
5.1	Propostas para trabalhos futuros	60
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICES	69
	APÊNDICE A – RESULTADO DA MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	71
	APÊNDICE B – RESULTADO DA MEDIÇÃO DA DUREZA	73
	ANEXOS	74
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DO ARAME ER70S-6	75
	ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES DA FRESA	76
	ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES DA FRESADORA CNC VEGA XH7132	77
	D – ESPECIFICAÇÕES DA SERRA FITA FRANHO FM 500	78
	E – CÓDIGO DO PROGRAMA	79
	F – ESPECIFICAÇÕES DO DURÔMETRO ZWICK ROELL ZHU 250	81
	G – ESPECIFICAÇÕES DO FLUIDO DE CORTE BIO100E	82

1 Introdução

A manufatura aditiva (MA) também conhecida como impressão 3D é um processo de manufatura que permite a fabricação de peças por deposição sucessiva de material camada sobre camada, seguindo um modelo gerado por um Desenho Assistido por Computador (CAD - *Computer Aided Design*) (SABERI et al., 2010). Essa característica permite produzir peças com geometrias complexas que, em alguns casos, não poderiam ser obtidas pela manufatura tradicional (VAFADAR et al., 2021).

Deve-se ressaltar também que o processo de manufatura aditiva possui um potencial de redução de desperdício de energia e material na hora da produção, em comparação ao processo de manufatura convencional. Mesmo que um processo de fabricação seja eficiente, sempre existe desperdício de material e em alguns casos esse desperdício pode ser amplificado devido a um possível erro humano e/ou erro da máquina (REJESKI; ZHAO; HUANG, 2018).

Além das vantagens apresentadas, pode-se destacar que a manufatura aditiva é um recurso que permite aos projetistas criarem modelos complexos, com menos limitações de fabricação em comparação à manufatura tradicional, utilizando um menor número de processos (VAFADAR et al., 2021). Somado a isso, pela manufatura aditiva é possível reduzir a quantidade de peças para produzir uma mesma estrutura em comparação à manufatura tradicional. Com essa redução de peças necessárias, é reduzido também o tempo de montagem, ou há até a eliminação da necessidade de montagem de peças para o produto final (WONG; HERNANDEZ, 2012). Dessa forma, é possível notar que este processo pode ter aplicabilidade para diversas indústrias. A figura 1 representa os diferentes setores que adotaram a manufatura aditiva no ano 2018.

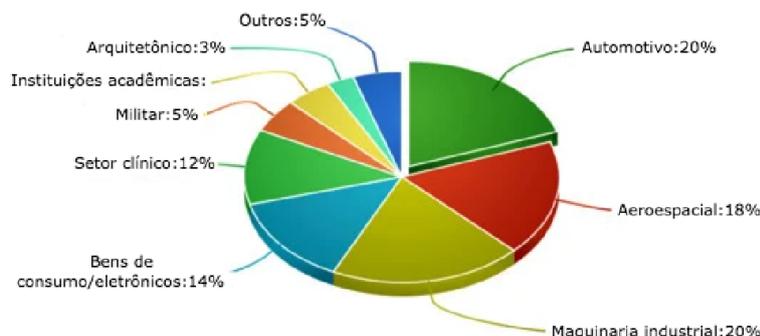


Figura 1 – Adoção industrial da manufatura aditiva (Adaptado de Vafadar et al., 2021)

Além da versatilidade de setores, a MA permite a fabricação de peças com matérias primas variadas. Uma peça produzida por manufatura aditiva pode ser fabricada com diversos materiais, como metais, polímeros e cerâmicos (VAFADAR et al., 2021), essa metodologia pode inclusive ser adotada na indústria alimentícia, a figura 2 exemplifica a manufatura aditiva de chocolate (KARYAPPA; HASHIMOTO, 2019).



Figura 2 – MA com chocolate, barra de escala de 1 cm. Fonte: (KARYAPPA; HASHIMOTO, 2019)

Para a indústria mecânica a classe de materiais que se destaca são os metais. Como se pode observar nas figuras 3 e 4, peças fabricadas com metal podem ser utilizadas no setor artístico e também podem ser utilizadas no setor industrial (ver figura 5). Deve-se ressaltar, no entanto, que dependendo do material que for utilizado e do processo de deposição, as propriedades mecânicas da peça final irão variar (HACKENHAAR, 2021).

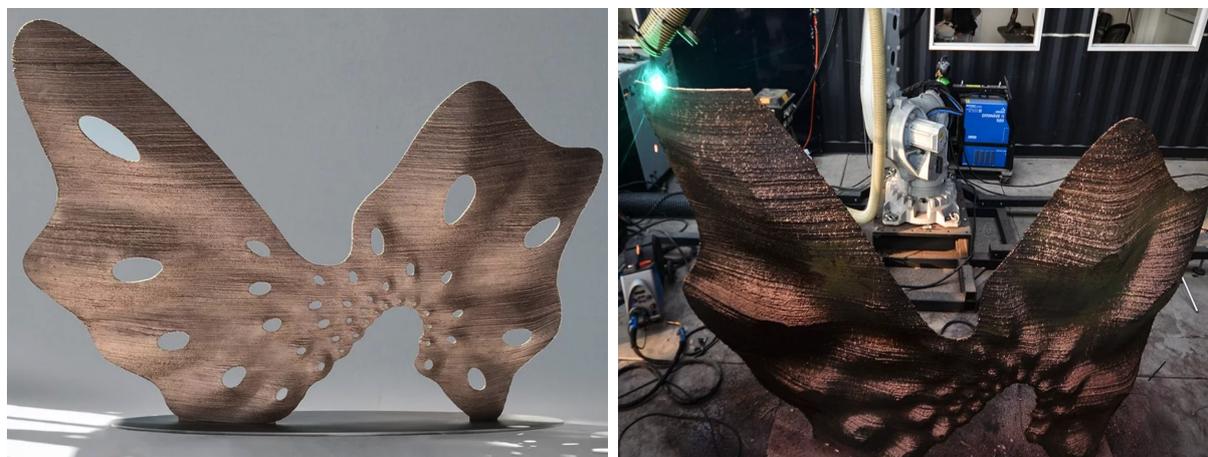


Figura 3 – Obra de arte - "The Butterfly Screen". Fonte: (MX3D, 2022a).



Figura 4 – Obra de arte - "Oregon Dragon Bench". Fonte: (MX3D, 2022b)

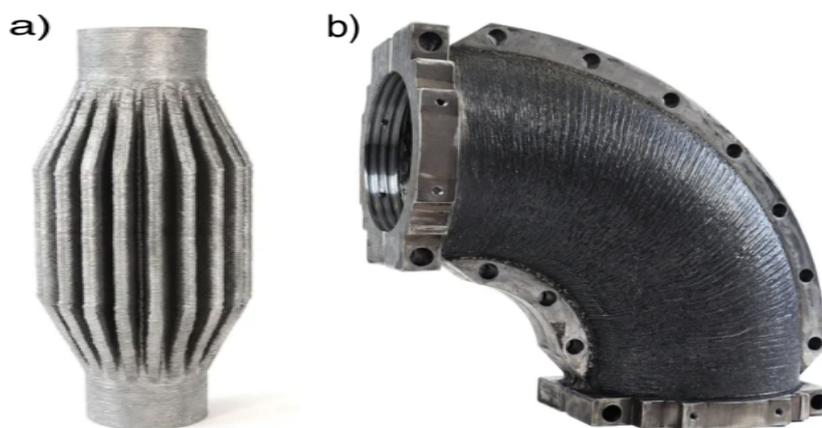


Figura 5 – Peças de reposição fabricadas por manufatura aditiva. Fonte: (a) e (b) (MX3D, 2022c)

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é um processo de fabricação que utiliza o arco elétrico como fonte de calor, sendo as duas principais fontes os processos de GMAW e GTAW onde ambos utilizam o arco elétrico como fonte de calor e o gás como proteção. Se utilizam processos tradicionais de soldagem por meio de deposições sucessivas em camadas, essa deposição pode ser realizada com um ou mais de um tipo de arame, dependendo da necessidade da peça final (ROSA, 2020).

Um exemplo do uso da MADA pode ser observada no trabalho realizado por Cervantes et al. (2019). Os autores estudaram a deposição do arame ER70S-6 para a fabricação de uma chave fixa, popularmente conhecida como chave de boca. Neste trabalho é possível notar que o acabamento superficial em uma peça produzida por MA é irregular e que precisa de um processo pós processamento para melhorar o acabamento superficial da peça e alcançar as dimensões requeridas. A figura 6 apresenta uma chave fixa produzida

por MADA após a deposição e a figura 7 a mesma peça após o processo de usinagem para obtenção de um melhor acabamento superficial e para retirá-la do substrato. Este tipo de efeito é comum na MADA, desta forma é relevante o estudo do acabamento destas peças através da usinagem.

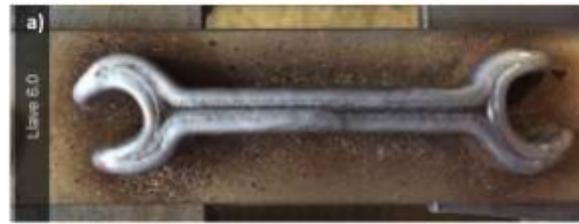


Figura 6 – a) e b) - Peças obtidas por MA com o arame ER70S-6. Fonte: (CERVANTES et al., 2019)



Figura 7 – a) e b) - Peças obtidas por MA com o arame ER70S-6 após um processo de usinagem. Fonte: (CERVANTES et al., 2019)

1.1 Motivação

Com os países demandando a redução na quantidade de emissões de contaminantes e uso de recursos naturais, a otimização na manufatura é de suma importância. Na hora de fabricar um objeto de maneira convencional, é possível que a peça seja fabricada em um bloco sólido por fundição ou forjamento e posteriormente usinada até obter o formato desejado, o que resulta em grande descarte de material na forma de cavaco. A manufatura aditiva é capaz de produzir uma peça com forma próxima à necessária, assim o desperdício de material e de energia é minimizado na etapa de usinagem em comparação à fabricação convencional, consequentemente, este processo auxilia na redução de recursos usados e formação de contaminantes (FUCHS et al., 2020).

Além disso, a manufatura aditiva permite produzir geometrias complexas porém, alguns processos ainda geram baixa qualidade superficial e tolerâncias dimensionais relativamente pobres. Por outro lado, a manufatura tradicional permite que componentes sejam produzidos com precisão porém com um menor nível de complexidade (NEWMAN et al., 2015). Então uma forma viável de otimizar a fabricação é obter a geometria principal da peça através da MA e posteriormente realizar a usinagem, apenas das camadas superficiais, para obter tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas.

A figura 8 contém uma peça que foi produzida por MA e que foi usinada para melhorar seu acabamento superficial. Pode-se então observar a importância do pós-processamento após a MA da peça, além da diferença superficial notável, na peça apresentada na figura 8 foi preciso ainda adicionar detalhes, através da realização de furos para a peça obter a geometria final.

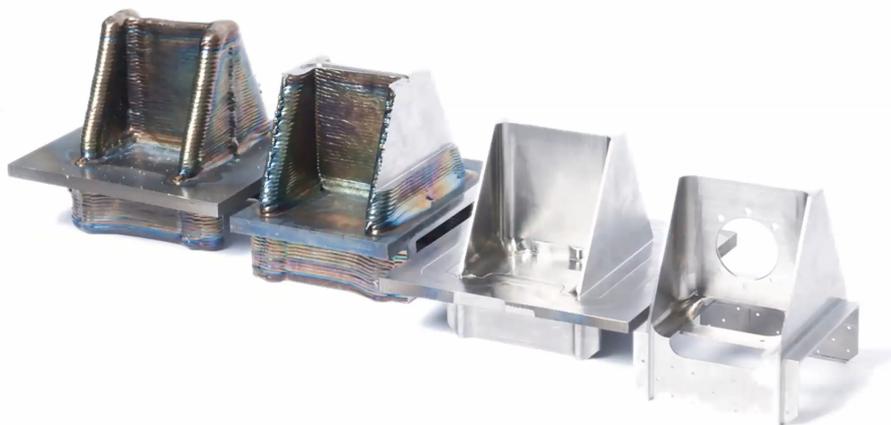


Figura 8 – Peça produzida por MADA e usinada para obter o acabamento final. Fonte: (3DPRINTING, 2021)

1.2 Objetivo

O presente estudo teve como objetivo:

- Estudar a relação da velocidade de corte no acabamento superficial de uma peça produzida por manufatura aditiva por deposição a arco elétrico com o arame ER70S-6 no processo de fresamento;
- Avaliar a rugosidade superficial na superfície usinada;
- Obter os dados da dureza na superfície usinada e comparar com a superfície não usinada;
- Obter imagens do canal usinado com detalhes das imperfeições;
- Definir qual valor da velocidade de corte testado proporciona um melhor acabamento superficial.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva é um processo de fabricação por meio de adição sucessiva de material em forma de camadas. A deposição de camadas é controlada com a informação fornecida pela representação geométrica originada do sistema CAD (*Computer Aided Design*). Em comparação ao meio de manufatura tradicional, a MA é um processo mais automatizado e mais rápido (VOLPATO, 2017). Segundo Gibson (2015), o processo de MA segue 8 passos:

1. CAD - Todas as peças produzidas por MA precisam começar por um modelo que descreve a geometria externa da peça.
2. Conversão para STL (*Standard Tessellation Language*) - Quase todas as máquinas de MA aceitam o formato STL, por isso se tornou o formato padrão. Esse formato descreve a superfície externa fechada do modelo original do CAD e elabora os cálculos básicos das camadas de deposição.
3. Transferir os dados para uma máquina de MA que aceita arquivos STL - O arquivo que descreve a peça deve ser enviado para a máquina de MA. Nesta etapa podem ocorrer adaptações como a correção no tamanho da peça, posicionamento e orientação da manufatura.
4. Configuração da máquina - A máquina de MA precisa ser configurada para o processo com ajustes para a fonte de energia, o tipo de material, a espessura da camada, o tempo, etc.
5. Fabricação - A fabricação da peça pode ocorrer de forma automática, sem a necessidade de ter uma supervisão. No entanto, é necessário um mínimo de monitoramento da máquina para garantir que não tem nenhuma falha como falta de material de deposição, falta de energia, algum problema no *software*, etc.
6. Remoção - Uma vez que a máquina de MA terminou a fabricação, as peças precisam ser removidas.

7. Pós-processamento - Uma vez removidas da máquina, as peças precisam de um processo de acabamento superficial antes do seu uso. As partes podem estar frágeis nesta etapa do processo e é necessário ter cuidado na remoção dos suportes da fabricação, caso existam.
8. Aplicação - As peças podem ou não estar preparadas para o uso, caso necessário um novo tratamento adicional para o uso adequado da peça pode ser realizado.

Na hora de escolher o processo de fabricação de uma peça, é preciso considerar a quantidade de peças que serão produzidas, a complexidade geométrica dela e se futuramente será necessário alterar sua geometria. De acordo com os modelos de custos atuais, para uma produção em massa é melhor fabricar pelos métodos tradicionais, no entanto, para fabricar materiais complexos ou que passam por constante alteração geométrica, a MA é mais adequada (PEREIRA; KENNEDY; POTGIETER, 2019).

2.2 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

Dentre as técnicas de manufatura aditiva, cita-se a Manufatura Aditiva por deposição a Arco (MADA), também conhecida por WAAM, do inglês *Wire and Arc Additive Manufacturing*, e é uma das técnicas utilizadas para a manufatura aditiva de metais. Neste processo, a peça também é obtida ao adicionar camada por camada gerando a deposição do material, tendo como fonte de energia um arco elétrico (DING et al., 2016). A figura 9 apresenta o esquema do processo MADA.

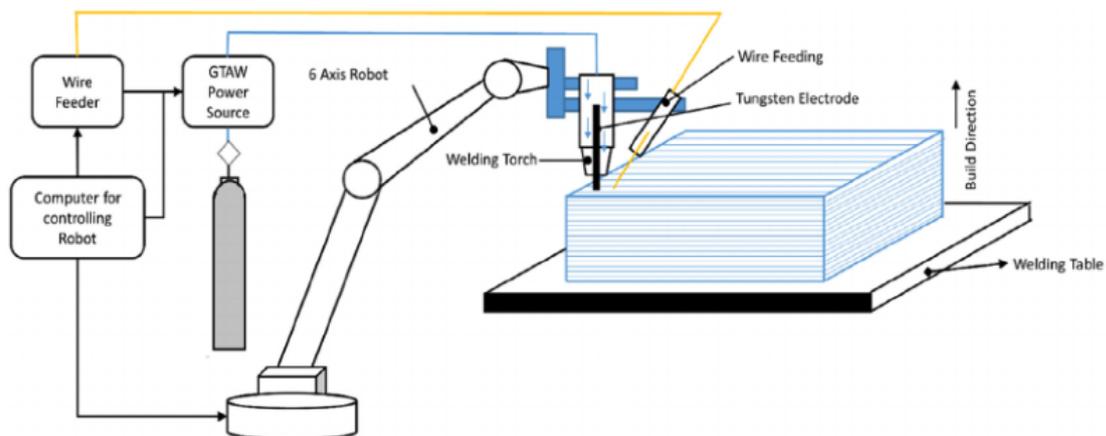


Figura 9 – Esquema genérico do processo MADA. Fonte: (VIMAL; SRINIVAS; RAJAK, 2021)

Similar ao mostrado para a MA, o processo MADA pode ser também dividido em etapas. A primeira etapa consiste no planejamento de processo, nesta etapa está incluída a geração de modelo CAD. Na segunda etapa, o modelo CAD gerado previamente irá

guiar a tocha que realizará o processo de deposição do material. A última etapa consiste no pós-processamento, que é utilizado para melhorar as propriedades mecânicas da peça final (WU et al., 2018). Na figura 10 se pode ver uma ilustração de como o material é depositado para formar uma parede através do método MADA.

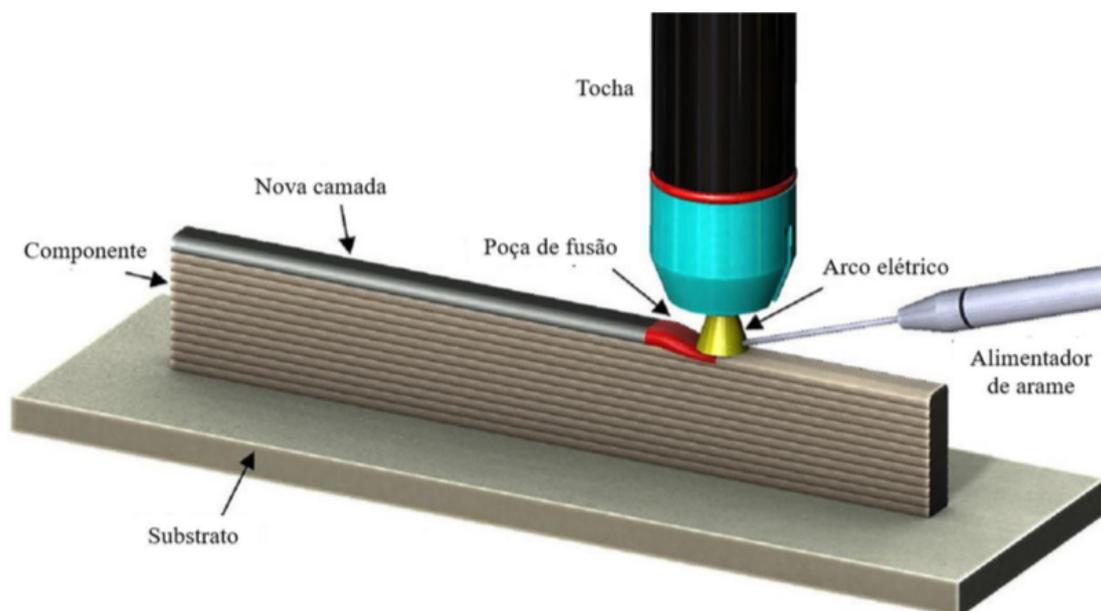


Figura 10 – Ilustração do processo MADA. Fonte: Adaptado de (MCANDREW et al., 2018)

Dependendo das características do processo e de como o arco elétrico será gerado, podem-se destacar três tipos de processos MADA: com base em MIG/MAG, com base em TIG e com base em soldagem a plasma, cada um com suas características específicas (WU et al., 2018). Segundo Wu et al. (2018) a MADA baseada em MIG/MAG se destaca pois a taxa de deposição é quase 3 vezes maior do que os métodos baseados em TIG ou por soldagem a plasma. No entanto, é menos estável e gera mais respingo e fumos.

Dentro do processo MADA na modalidade MIG/MAG, existe uma variação do processo como CMT (Cold Metal Transfer). Este processo inicialmente surgiu da necessidade de soldar as peças (chapas) finas. Este processo consiste em curto-circuito controlado, um modo de transferência metálica a "frio", que é caracterizado pela baixa corrente e tensão, conseqüentemente, baixo aporte térmico (IMOUDU; AYELE; BARABADI, 2017). Algumas das principais características que diferenciam esses métodos são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do CMT, MIG/MAG e TIG. Fonte: Adaptado do (IMOUDU; AYELE; BARABADI, 2017)

Processo	Vantagens	Desvantagens
TIG	Normalmente produz soldas sem defeito	Alto custo financeiro para soldar substratos com mais de 10 mm
	Não respinga	A integração da deposição com o substrato é mais baixa do que com o processo de ER
	A fonte de calor e de metal são controladas independentemente	É mais difícil soldar manualmente
MIG/MAG	Alta produtividade comparando com o eletrodo revestido (ER) e TIG.	O arco precisa ser protegido contra contaminantes
	Comparando com o ER, precisa de pouca limpeza depois da soldagem.	Equipamento mais complexo, em comparação com o ER
	Facilidade em automatizar	Respinga
CMT	Redução significativa na transferência de calor comparando com os métodos convencionais de soldagem	O nível da corrente no curto-circuito é mínimo
	Controle perfeito do comprimento do arco comparando com os métodos tradicionais	Os limites superiores de aplicação são próximo ao arco curto convencional do processo, ou seja, quando a zona de transição começa.
	Não respinga	O limite inferior de aplicação do processo é menor do que o curto-circuito convencional

2.2.1 Características mecânicas das peças feitas por manufatura aditiva

Devido ao processo de deposição da manufatura aditiva, o material é submetido a processos térmicos durante a fabricação. Esses processos térmicos diferem dos que usualmente ocorrem na fundição, soldagem ou tratamentos térmicos. A rápida solidificação e as variações térmicas no metal na MA impactam a micro estrutura dos materiais depositados, o que altera as propriedades mecânicas do material. As principais propriedades que sofrem alteração são a ductilidade, a dureza, a resistência à fadiga, a resistência à tração, resistência ao escoamento e a formação de uma anisotropia no material (LEWANDOWSKI; SEIFI, 2016). Imperfeições são produzidos durante fabricação de peças por

MA, e podem fazer com que as peças fraturem antes do esperado. Essas imperfeições podem ser causadas por impurezas, fissuras e porosidade na peça (DEBROY et al., 2018).

A porosidade pode ser formada pelo encolhimento, pela fusão e/ou pela falta de ligação do material na MA. Caso ocorram por esse motivos, serão considerados "poros irregulares". Por outro lado, podem formar-se poros esféricos, formados por bolhas de gás ou pelas turbulências de Marangoni na região de fusão e de evaporação do material (BOURELL et al., 2017). A figura 11 mostra os tipos de imperfeições que podem ocorrer na peça.

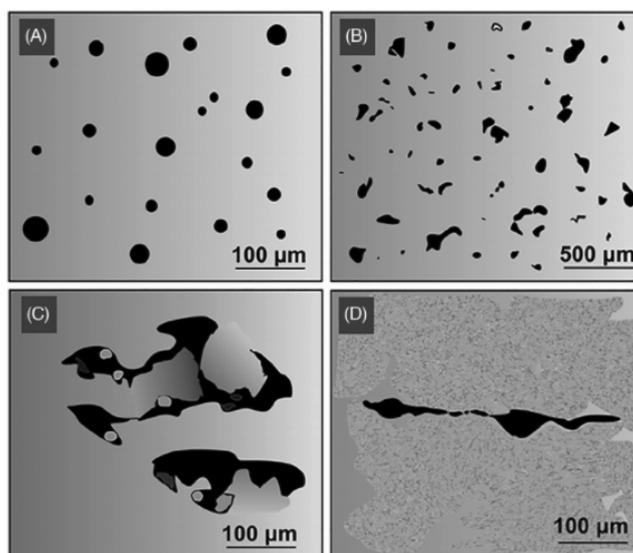


Figura 11 – Tipos de poros que aparecem em peças fabricadas por MA a base de laser: (A) Porosidade de gás aprisionado; (B) Porosidade induzida por fusão incompleta; (C) Falta de fusão com partículas não derretidas dentro de grandes poros irregulares; (D) Fissuras. Fonte: (SOLA; NOURI, 2019)

As fissuras podem ser formadas no momento da solidificação, e podem ser vistas ao longo dos limites de grão, podem ser formadas na zona parcialmente fundida ou podem ser formadas entre duas camadas (MASKERY et al., 2016). No segundo caso, a fissura se forma no momento da solidificação devido à temperatura da camada anterior ser menor do que a que está sendo depositada, essa diferença de temperatura ocasiona tensões de tração que, quando a magnitude dessas tensões excedem a resistência do material, geram trincas. A fissura formada na zona parcialmente fundida é formada devido à força de contração gerada ao solidificar o metal (MASKERY et al., 2016).

Além disso, no momento que a peça está solidificando, é possível que ocorra a formação de trincas. Os altos ciclos térmicos que envolvem o processo MADA fazem com que a peça deforme de maneira irregular. Esse defeito ocasiona uma anisotropia e, conseqüentemente, uma peça com piores propriedades mecânicas (WU et al., 2018). A falta de precisão, a instabilidade do arco ou a parametrização incorreta do processo podem ocasionar deformações e problemas no acabamento superficial da peça.

Durante o processo de deposição de material, se não houver a proteção adequada, a peça pode ainda oxidar devido à exposição com um ambiente rico em oxigênio. Essa oxidação pode fragilizar a estrutura do cordão depositado devido aos óxidos formados na peça que atuam como impurezas na poça de fusão, assim, contribuindo a imperfeições como trincas e poros (HAUSER et al., 2021).

Outro fator que agrava o surgimento de imperfeições é usar compostos bimetálicos, o que favorece a delaminação, essa delaminação ocorre devido à diferença de propriedades mecânicas de solidificação de cada metal. Este fato cria uma fase intermetálica fraca, gerando trincas e fraturas na região. Somado a isto, no deslocamento das camadas depositadas existe uma baixa penetração o cordão, assim fragilizando ainda mais a região (NOVELINO, 2021) (WU et al., 2018).

Zhang et al. (2019) realizaram um estudo sobre a propagação de trincas em uma peça fabricada por MADA, utilizando o arame de Ti-6Al-4V. Para comparar a propagação da trinca, os autores produziram duas peças com o a mesma liga, sendo uma parte produzida por MADA e o substrato por forjamento. Na figura 12 pode-se observar como foram produzidas as duas peças com uma parte produzida em MADA e outra forjada.

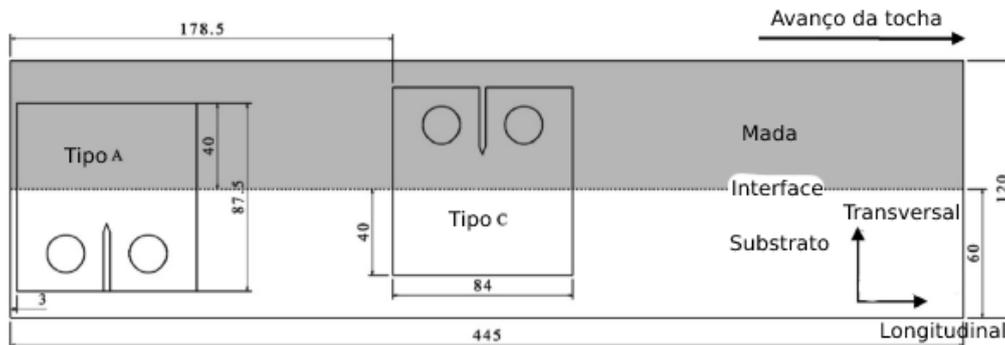


Figura 12 – Layout dos testes. Fonte: adaptado do (ZHANG et al., 2019)

Para entender os efeitos da propagação da trinca por fadiga foi preciso estudar a microestrutura e a tensão residual no material. Se obteve como conclusão que a diferença de propagação da trinca no substrato e na MADA é devido à diferente característica microestrutural das duas. Na parte do substrato a trinca se propagou mais devido à estrutura equiaxial, na parte produzida por MADA a trinca não se propagou tanto devido à estrutura laminar. Os autores comentam ainda que a magnitude do efeito da tensão residual irá depender da localização e da direção de propagação da trinca (ZHANG et al., 2019).

No estudo realizado por Cervantes et al. (2019), que utiliza o mesmo material deste estudo, se observou uma microestrutura com ferrita e perlita, sendo a peça fabricada com o arame ER70S-6. Os autores concluíram que a microestrutura concorda com a composição e a curva de resfriamento do tipo de material utilizado para a deposição. A microestrutura observada se dividiu em três zonas diferentes. A zona inferior tinha uma estrutura ferrítica

com finas camadas de perlita, a zona do meio com uma estrutura laminar de bainita e por último, a zona superior foi caracterizadas por grãos equiaxiais de ferrita e perlita. A diferença das três microestruturas se deve à diferença de temperatura experimentada durante a deposição das capas.

Vale ressaltar que deposições na MADA com baixa taxa de transferência de calor e baixa temperatura de pré-aquecimento resultam em uma solidificação com maior dureza e menor rugosidade, favorecendo uma melhor formação de cavacos na hora de usar. Os parâmetros de fresamento tem um impacto significante na cinemática e na dinâmica do fresamento. Pelo ponto de vista dinâmico, as paredes produzidas por MADA com menor tempo de resfriamento produz um componente com menos rigidez, provocando a vibrações durante o fresamento (CHERNOVOL et al., 2021).

2.3 Fresamento

O processo de usinagem por fresamento possui uma grande variação quanto ao tipo de equipamento, ao movimento da peça e aos tipos de ferramentas. As principais aplicações do processo são: a obtenção de superfícies planas, rasgos, ranhuras, perfis, contornos, cavidades e roscas. O movimento relativo pode ser resultante apenas da movimentação da ferramenta sobre a peça ou ser resultante da combinação de movimentos de peça e ferramenta (KRATOCHVIL et al., 2004) (VALLE et al., 2001). Usualmente este processo é realizado em uma fresadora, que é uma máquina-ferramenta que permite movimentar a peça em eixos lineares ou giratórios e na qual a ferramenta possui movimento de rotação (KRATOCHVIL et al., 2004).

A figura 13 representa a remoção do cavaco produzido no fresamento. A formação de cavaco é diferente da que ocorre nos processos de torneamento ou furação, uma vez que o cavaco é formado de forma descontínua, através do corte interrompido. Isso ocorre pois a cada revolução da ferramenta diversas arestas de corte formarão cavaco de forma independente, assim serão formados cavacos em número proporcional ao número de dentes da fresa (VALLE et al., 2001).

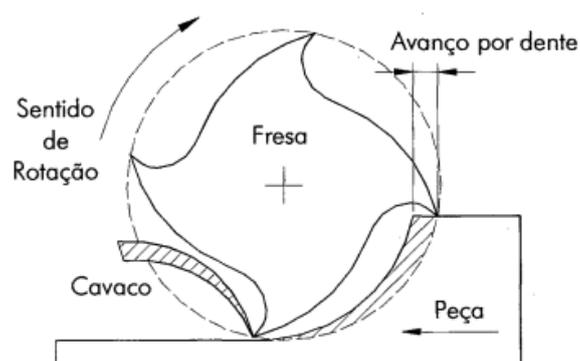


Figura 13 – Exemplo da remoção de material no fresamento. Fonte: (VALLE et al., 2001)

Segundo a direção de corte e avanço, o fresamento pode ser distinguido entre fresamento concordante e fresamento discordante, inclusive o simultâneo, que seria ambos ao mesmo tempo. No fresamento concordante (figura 13), os movimentos de corte e de avanço têm o mesmo sentido e o corte começa com espessura máxima do cavaco, para os parâmetros selecionados, assim o cavaco é formado já no início do corte. No fresamento discordante, a espessura inicial de corte é zero, com isso, no início do corte não há remoção de cavaco, apenas esmagamento do material da peça até que a espessura seja suficiente e se inicie a formação de cavaco (KRATOCHVIL et al., 2004).

2.3.1 Tipos fundamentais de fresamento

O fresamento pode ser dividido em dois métodos principais, o método de fresamento de topo e o método de fresamento tangencial, é possível combinar os dois métodos, dependendo do tipo de peça e ferramenta utilizadas (VALLE et al., 2001).

- Fresamento de topo: entre as possíveis variações do processo de fresamento, a mais versátil é o fresamento de topo, que é utilizado na produção de ranhuras, cavidades, rebaixos, gravações, rasgos e na matrizaria (KRATOCHVIL et al., 2004). A fresa de topo é capaz de cortar em sua periferia e na sua face uma vez que possui arestas de corte em ambos lados (aresta principal e secundária). Elas podem ter o corte tanto à direita como à esquerda, com ranhuras em hélice nos dois sentidos (MACEDO, 2001). Podem ser produzidas com topo simples ou duplo, com haste e corpo cilíndricos ou cônicos, em vários diâmetros e comprimentos com dois ou mais canais, sendo na maioria helicoidais ou retos. O topo pode ainda ser reto ou esférico. A fresa de topo pode ser inteiriças, com insertos ou gumes soldados, inclusive com insertos intercambiáveis (MACEDO, 2001).
- Fresamento tangencial: no fresamento tangencial as arestas cortantes, que estão na superfície cilíndrica da ferramenta, estão paralelas à superfície da peça a ser usinada (FERRARESI et al., 1970). O fresamento tangencial pode ser concordante ou discordante, dependendo do sentido do movimento de avanço. O fresamento tangencial concordante ocorre quando o sentido do movimento de avanço é igual ao sentido de rotação da fresa como se pode observar na figura 14 (a), caso contrário, é um fresamento tangencial discordante 14 (b). (SILVA, 2014). Se a peça e o sistema de fixação permitirem, é recomendado usinar por fresamento concordante (SANDIVIK, 2022a). Nas operações de fresamento tangencial o diâmetro da fresa é o que determina a máxima profundidade de corte. Por outro lado, nas operações de fresamento de topo, o comprimento axial dos gumes, o que determinam a máxima profundidade de corte (MACEDO, 2001). Na figura 14 pode-se observar a diferença entre um fresamento tangencial concordante e um fresamento tangencial discordante e na

figura 15 se pode observar a diferença na usinagem entre o fresamento tangencial e o fresamento de topo.

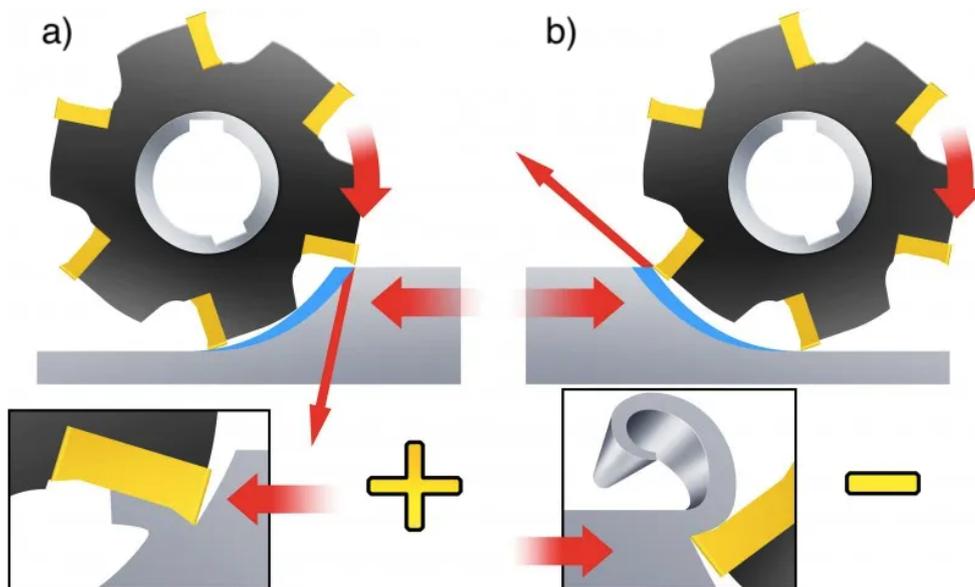


Figura 14 – Fresamento tangencial concordante (a) e fresamento tangencial discordante (b). Fonte: (SANDIVIK, 2022a)

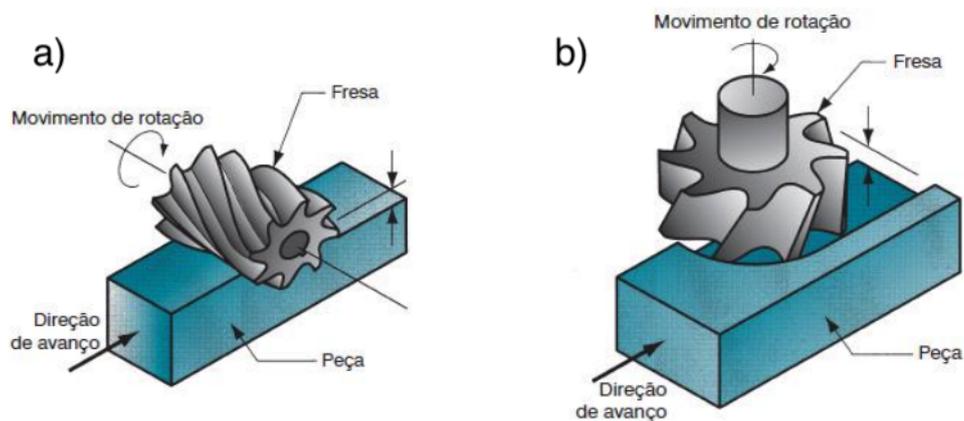


Figura 15 – Modos de fresamento. Fresamento tangencial (a) e fresamento de topo (b) . Fonte: (GROOVER, 2000), p. 387

2.3.2 Vibrações no fresamento

No fresamento, podem ocorrer dois tipos de vibrações: a vibração que é produzida externamente e a vibração que é produzida pela própria máquina (MACEDO, 2001). A vibração produzida no sistema faz com que a peça vibre e, conseqüentemente, a superfície da peça perde qualidade superficial e passa a ficar com característica ondulada. A ondulação faz com que a peça não tenha o acabamento esperado, com isso, dependendo

da fase entre a frequência natural da fresa e a ondulação produzida na peça, pode ocorrer um aumento na amplitude da vibração e conseqüentemente o aumento das imperfeições na superfície da peça. Este fenômeno usualmente ocorre quando o processo apresenta alta remoção de cavacos (MACEDO, 2001). As vibrações produzidas externamente ocorrem devido às forças transmitidas através da fundação da máquina, através de danos ou imperfeições em elementos que causam um desbalanceamento que pode produzir falhas nos mancais e choques em engrenagens. As variações de força devido à mudança de direção e a interrupção do corte no fresamento também ocasionam vibrações deste tipo (MACEDO, 2001).

As vibrações auto-excitadas, ou vibração regenerativa, ocorrem quando o sistema opera na frequência natural, sem interferências de forças externas. A principal fonte de vibração regenerativa ocorre na formação do cavaco. Este tipo de vibração vai depender das condições de corte, do tipo de material da peça, do avanço da fresa, da velocidade de corte, da profundidade de corte radial e axial, da quantidade de número de dentes da fresa, da orientação dos modos de vibração do sistema e da estrutura da máquina e peça (rigidez, amortecimento e massa) (MACEDO, 2001). Na figura 16 se pode ver como a vibração no sistema prejudica no processo de fresamento.

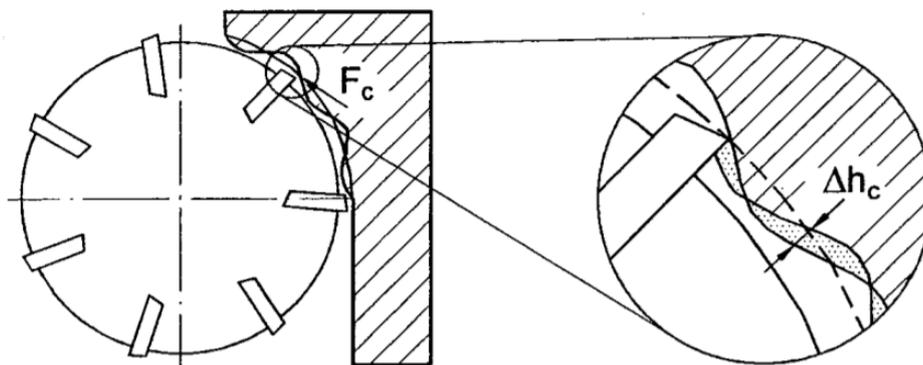


Figura 16 – Modelo dinâmico da superfície produzida por fresamento. Fonte: (MACEDO, 2001)

2.4 Forças no fresamento

Ao usinar um material, devido à dinâmica do processo, forças resultantes ocorrem na ferramenta de corte. Conhecer a grandeza e a direção da força é de suma importância, elas são influenciadas diversos fatores que estão representados na figura 17 (MACEDO, 2001).

As forças no fresamento estão relacionadas com a profundidade de corte em cada posição. As forças são cíclicas e vão depender do número de dentes da fresa no perfil de

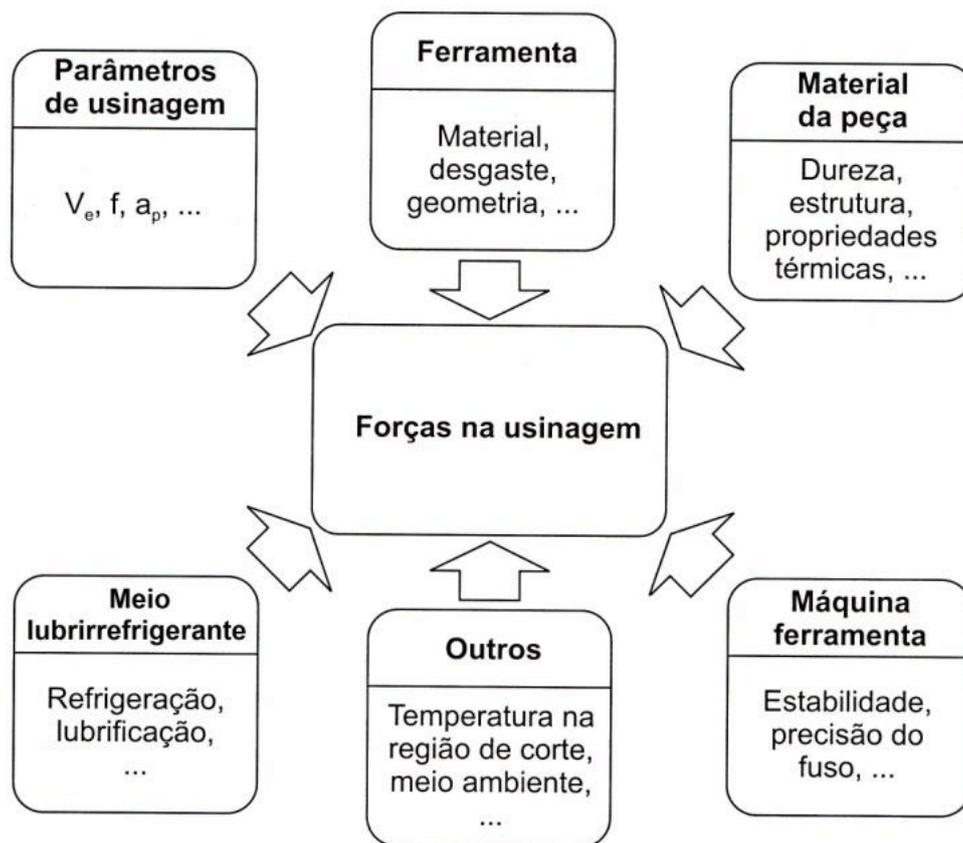


Figura 17 – Fatores de influência sobre a força de usinagem. Fonte: (BLÖDORN et al., 2014)

força na direção de corte. Se pode comparar a diferença de força que se precisa aplicar quando muda a quantidade de número de dentes na fresa na figura 18.

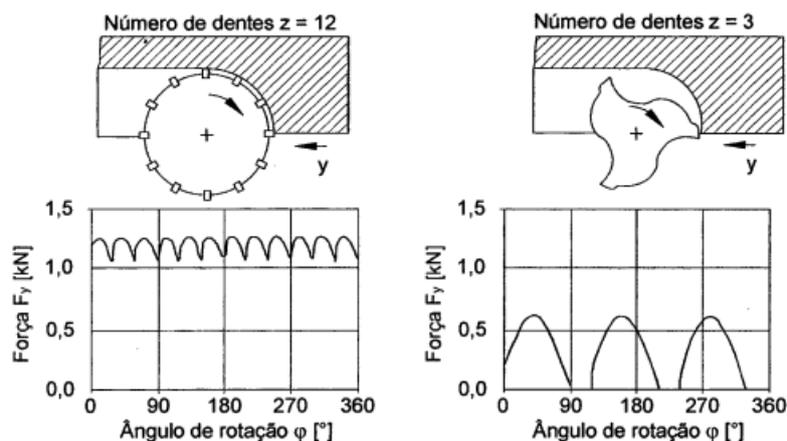


Figura 18 – Influência do número de dentes da fresa quando aplica uma força. Fonte: (MACEDO, 2001)

A figura 19 mostra as forças durante o fresamento na qual a força total que atua sobre a aresta de corte durante a usinagem é chamada de força de usinagem (F_u) (P_u na figura 19). As componentes desta força são a força ativa (F_t) (P_t na figura 19). A força que

é perpendicular ao plano de trabalho é conhecida como força passiva (F_p) (P_p na figura 19). A força de usinagem é dividida em força de corte (F_c) (P_c na figura 19), em força de avanço (F_f) (P_f na figura 19), força de apoio (F_{ap}) (P_{ap} na figura 19) e força efetiva (F_e), que não está sendo representada na figura 19 que é a projeção da força de usinagem sobre a direção efetiva do corte (RIGATTI, 2010).

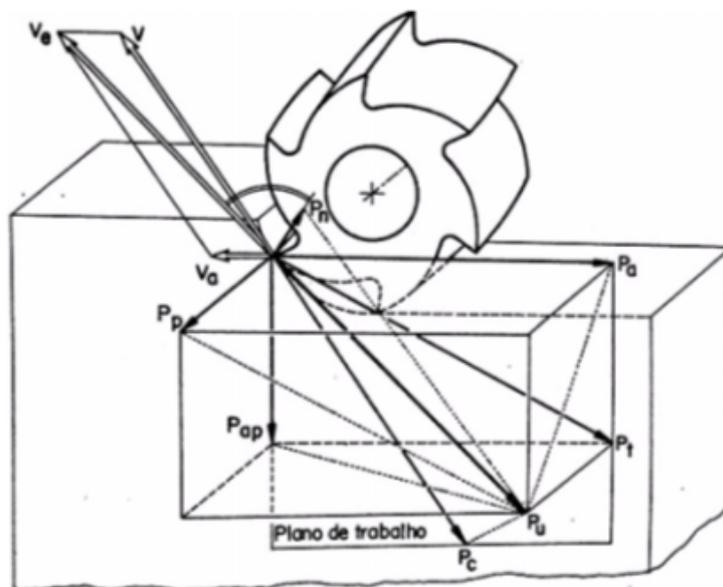


Figura 19 – Forças de usinagem em fresamento tangencial e suas componentes na operação de fresamento. Fonte: (FERRARESI, 2018), p. 157

2.5 Influência dos principais parâmetros de corte na qualidade da peça no fresamento

Para a adequada seleção das condições de corte e para otimizar a produtividade é importante conhecer os parâmetros que mais influenciam no processo de fresamento. Dentre os diferentes parâmetros, os que mais influenciam no desgaste da ferramenta e na qualidade da peça são a velocidade de corte (V_c), a velocidade de avanço (V_f), a penetração de trabalho, também conhecido como profundidade de corte radial (a_e), a profundidade de corte axial (a_p) e o diâmetro da ferramenta (D) (VALLE et al., 2001)(POLLI et al., 2005). A influência desses parâmetros no fresamento será detalhada a seguir.

Segundo Hioki (2006) o movimento de corte é o movimento que, pela rotação da ferramenta em torno do seu eixo, remove o material em uma volta, já o movimento de avanço é definido pelo autor como o movimento realizado pela máquina, tendo a peça fixa, e junto com o movimento de corte realiza a usinagem contínua do material. O avanço é a distância deslocada pela fresa em uma volta completa. Por último, o autor define ainda movimento efetivo como o resultado dos movimentos de corte e do avanço.

- Velocidade de corte: é a velocidade instantânea de um ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte. Ela apresenta uma pequena influência na energia específica de corte, comparando com os outros parâmetros de corte. O aumento da velocidade de corte faz com que a temperatura do material aumente, causando a redução na resistência mecânica do material e a queda da resistência ao cisalhamento do material usinado (RIGATTI, 2010), o que favorece o corte. Focando na ferramenta, o aumento da velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia na vida útil da ferramenta, que pode ser reduzida devido às altas temperaturas produzidas entre a peça e a ferramenta (VALLE et al., 2001). No estudo realizado por Lopes et al. (2020), foi usinada uma peça de aço de alta resistência e baixa liga, que foi produzida por MADA, figura 20 . No estudo os autores concluíram que, para essa peça, os parâmetros que deram a menor valor de rugosidade superficial ($R_a = 0,206 \mu\text{m}$) foram obtidos com a velocidade de corte de 65 m/min (o maior valor de V_c) e o uma velocidade de avanço por dente de 0,0115 mm/dente (o menor valor de f_z no ensaio). O estudo concluiu que o pior acabamento superficial ($R_a = 0,641 \mu\text{m}$) foi quando se aumentou o avanço por dente para 0,0345 mm/dente e diminuiu a velocidade de corte para 30 m/min, conforme esperado.



Figura 20 – Esquema da MADA e usinagem adaptado do Lopes et al. (2020).

Conseguir usinar com uma alta velocidade de corte, buscando uma maior taxa de remoção com um elevado grau de automação exige um processo de usinagem muito confiável, onde a previsibilidade do acabamento superficial, a precisão da peça e a vida das ferramentas são de suma importância para evitar imperfeições (RIGATTI, 2010). Imperfeições típicas ocasionadas pelo fresamento são: marcas de avanço, fluxo lateral do material, adesão do material na aresta podem surgir nas superfícies usinadas (LOPES et al., 2020).

- Velocidade de avanço: é a velocidade relativa entre o avanço da ferramenta com a peça a ser usinada (SANDIVIK, 2022b). A velocidade efetiva definida como a velocidade tangencial instantânea do movimento efetivo (HIOKI, 2006).
- Profundidade de corte (a_p): é a quantidade que a ferramenta penetra na peça enquanto realiza a usinagem. É o parâmetro de corte que, junto com o avanço, mais interfere na força de corte, ele tem o maior efeito no desempenho tribológico. Reduzir o valor da penetração de trabalho permite obter uma superfície mais lisa (HIOKI, 2006). Quando o a_p é muito grande, a quantidade de cavaco gerado na usinagem é maior. Esse cavaco será também mais largo o que pode prejudicar a extração dele, conseqüentemente o acabamento superficial piora (SIMÃO, 2018). Outro fator com grande influência na superfície é o avanço por dente, definido como a distância entre a superfície usinada e a superfície sem estar usinada. É um parâmetro de suma importância para determinar a formação do cavaco (HIOKI, 2006).

Barreto (2022) realizou um estudo de fresamento, utilizando fresas de aço rápido, sem revestimento e diâmetro de 5 mm, para usinar uma peça obtida por MADA (CMT), sendo o material de base para deposição o arame ER70S-6. A autora concluiu que este material não pode ser usinado com os mesmos parâmetros de cortes que aços com composição semelhante ao material do arame, fabricados de forma convencional. Foi relatado que os valores dos parâmetros para fresamento de aços presentes na literatura são muito elevados para aplicação no material obtido por MADA. Em seu estudo, devido principalmente à profundidade de corte, houve a quebra da ferramenta, a autora relatou que foi necessária a redução de 2,00 mm (segundo a literatura) para 0,25 mm (obtidos experimentalmente) para que o corte ocorresse de forma adequada.

No estudo realizado por Brito (2012), foi realizado um fresamento de topo com o aço ABNT 1045 (forjado, com dureza 180 HB) e após 82 ensaios obteve uma profundidade de corte adequada de $a_p = 1,414$ mm. O material utilizado pelo autor tem uma composição e dureza similar ao arame utilizado neste estudo, esse a_p pode ser utilizado como referência na hora de realizar o ensaio. Vale a pena mencionar que o estudo dele foi realizado com uma fresa diferente (R390-025A25-11M, da Sandivik).

- Penetração de trabalho(a_e): ou profundidade de corte radial, é o diâmetro da ferramenta que entra em contato no corte (SANDIVIK, 2022b). Para favorecer a visualização, na figura 21 observa-se a profundidade de corte axial (a_p) e a profundidade de corte radial (a_e) no fresamento de topo.

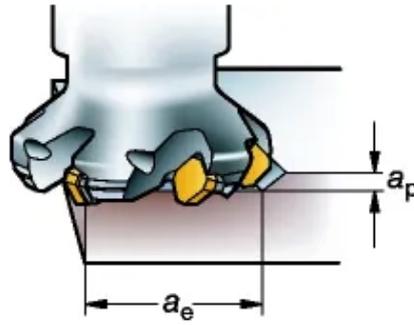


Figura 21 – Profundidade de corte radial e axial. Fonte: (SANDIVIK, 2022b)

- Número de dentes da fresa: é a quantidade de arestas de corte que a fresa possui. Dependendo da quantidade de números de dentes que a fresa possua, ela terá uma aplicação diferente, como se pode observar na figura 22. A figura 23 mostra um esquema do perfil de cada seção das fresas com diferentes números de dentes (também chamados de cortes). Para aumentar a vida da ferramenta, sem alterar os tempos de usinagem, se pode aumentar o avanço por dente e diminuir a velocidade de corte proporcionalmente (VALLE et al., 2001).

		2 cortes	3 cortes	4 cortes	6 cortes
Característica	Vantagem	Escoamento de cavaco é excelente. Indicada para mergulho. Baixo esforço de corte.	Escoamento de cavaco é excelente. Indicado para mergulho.	Alta rigidez.	Alta rigidez. Durabilidade superior da aresta de corte.
	Desvantagem	Baixa rigidez.	Diâmetro não é fácil de medir.	Baixo escoamento de cavaco.	Baixo escoamento de cavaco.
Aplicação		Rasgo, contorno, mergulho, etc. Amplo campo de utilização.	Rasgo, contorno. Desbaste, acabamento.	Pequenos rebaixos, contorno. Acabamento.	Material com Alta Dureza. Pequenos rebaixos, contorno.

Figura 22 – Características e aplicações de fresas de topo com diferentes números de corte. Fonte: (MITSUBISHI, 2022)

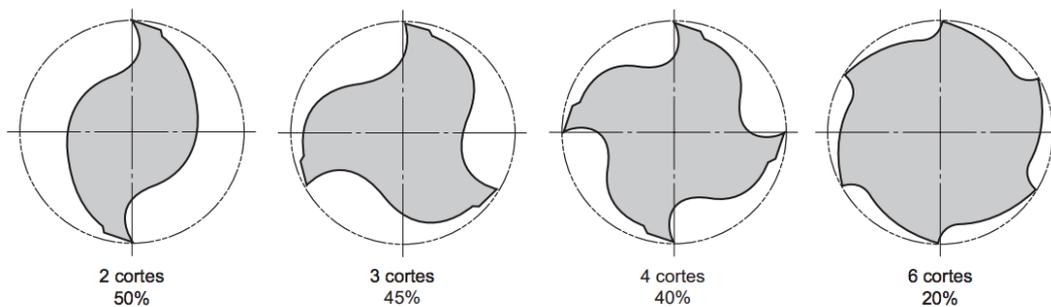


Figura 23 – Comparação da seção do bolsão de cavacos. Fonte: (MITSUBISHI, 2022)

2.5.1 Rugosidade

A rugosidade na peça usinada é constituída por erros resultantes do processo de corte. Durante os seus diversos tipos de operações, no processo de avanço sobre a peça e a formação do cavaco, as arestas acabam causando marcas, ranhuras e irregularidades sobre a superfície do material (MARTINS, 2019).

A rugosidade é um parâmetro que serve para analisar a qualidade da operação do fresamento, sendo que as diversas combinações dos parâmetros de fresamento geram uma rugosidade na superfície da peça. Para melhorar o acabamento da peça, é preciso definir melhor a combinação das forças e velocidades da operação (MARTINS, 2019). Segundo Machado et al. (2009), p.280, a rugosidade de uma peça pode ser avaliada por:

- Parâmetros de amplitude, que são determinados pela altura dos picos, pela profundidade dos vales ou por ambos, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- Parâmetros de espaço, que são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- Parâmetros híbridos, que são determinados pela combinação dos outros dois parâmetros mencionados anteriormente.

O avanço por dente e a profundidade de corte são os fatores que mais interagem com a rugosidade, sendo assim, quanto maior é a a_P e o avanço, pior é o acabamento superficial. Deve-se lembrar também que velocidades muito baixas também prejudicam o acabamento superficial (STIPKOVIC, 2012). Outra variável que influencia no acabamento superficial é o sentido do corte. O fresamento concordante gera melhor resultado no fresamento. O fresamento discordante tende a causar mais vibrações, o que prejudica no acabamento da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003), p. 200.

Os parâmetros medidos para a obtenção da rugosidade são os desvios em relação a uma linha média do perfil a qual é definida pelo ajuste de mínimos quadrados à linha nominal do perfil. A rugosidade média (R_a) na figura 24 é o parâmetro mais comumente utilizado na hora de descrever a rugosidade da superfície (VACARO, 2014).

Segundo Baptista e Simoes (2000), dependendo do valor obtido de rugosidade, pode-se definir o nível de acabamento da peça. Os valores da rugosidade média podem ser:

- $0,5 \mu\text{m}$, o nível de rugosidade resultante da peça é o equivalente ao de um polimento manual.
- $1,0 \mu\text{m}$, o nível de rugosidade é aceitável, porém requer um polimento manual.

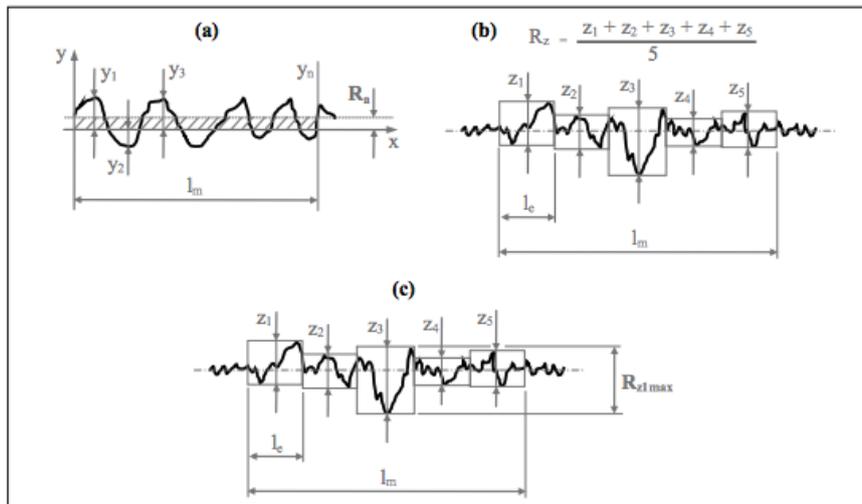


Figura 24 – Parâmetros de rugosidade. Fonte: (VACARO, 2014)

Para melhores valores de rugosidade média (ou seja, valores menores), será necessária a mudança e otimização de parâmetros na usinagem. É importante considerar que a rugosidade varia se for medida de forma longitudinal ou transversal aos canais, e que sempre deve ser medida na direção do avanço (BAPTISTA; SIMOES, 2000) (VACARO, 2014).

2.5.2 Principais parâmetros da rugosidade

Os principais parâmetros de rugosidade, segundo Machado et al. (2009), p. 281, são:

- Desvio aritmético médio - R_a - É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
- Desvio médio quadrático - R_q - É a raiz quadrada média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
- Altura total do perfil - R_t - É a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale de perfil no comprimento de avaliação.
- Altura máxima do perfil - R_z - É a soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos valores no comprimento de amostragem.
- Fator de assimetria do perfil - R_{sk} - É o quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e o desvio médio quadrático ao cubo, no comprimento de amostragem.
- Fator de achatamento do perfil - R_{ku} - É o quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor do desvio médio quadrático à quarta potência no comprimento de amostragem.

A figura 25 representa graficamente os parâmetros R_a e R_t . Para obter o valor do comprimento de amostragem (l_r) (figura 25), é preciso seguir a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002). Esse é o comprimento na direção do eixo X usado para identificar as irregularidades do perfil da amostra. O comprimento de amostragem também é conhecido como "cut-off". Por outro lado, o comprimento de avaliação (l_n), que é o comprimento na direção do eixo X usado para estabelecer o perfil sob avaliação, pode conter mais de um comprimento de amostragem. O recomendado, segundo Machado et al. (2009), p. 282, é tomar o valor de l_n cinco vezes o comprimento da amostragem para obter uma maior confiabilidade.

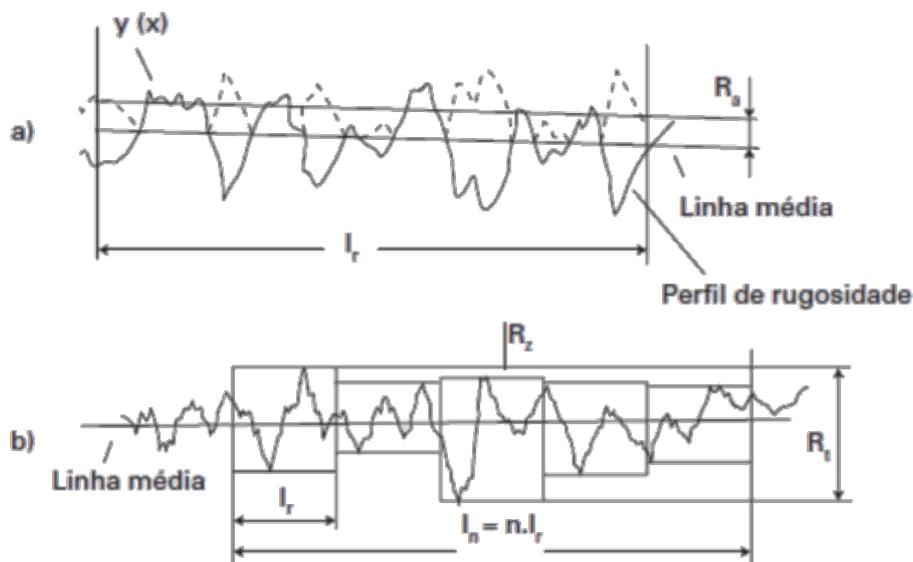


Figura 25 – Alguns parâmetros de rugosidade. Fonte: (MACHADO et al., 2009), p. 281

2.5.3 Dureza

A dureza de um material é a resistência mecânica a uma deformação plástica localizada no material. Foi desenvolvido um sistema quantitativo de dureza, conhecido como Escala de Mohs. Nessa escala, o menor valor é de 1, o que representa um material extremamente macio, como o talco e para o material mais duro, valor 10 nessa escala, é o diamante (CALLISTER, 2000).

A técnica de medir a dureza consiste em penetrar um pequeno indentador/pene-trador contra a superfície do material a ser medido, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação. Com os dados da medida da profundidade ou do tamanho da impressão resultante é possível relacionar ao número índice da dureza: quanto mais macio o material, maior e mais profunda é a impressão e menor é o número índice de dureza. Em comparação com os outros ensaios mecânicos, o ensaio de dureza é simples e barato, ele é considerado não-destrutivo e se pode estimar a dureza a partir de dados como o limite de resistência a tração (CALLISTER, 2000).

A dureza estimada para o arame ER70S-6, considerando o limite de resistência à tração do material, será entre 100 - 200 HB, seguindo o gráfico da figura 26.

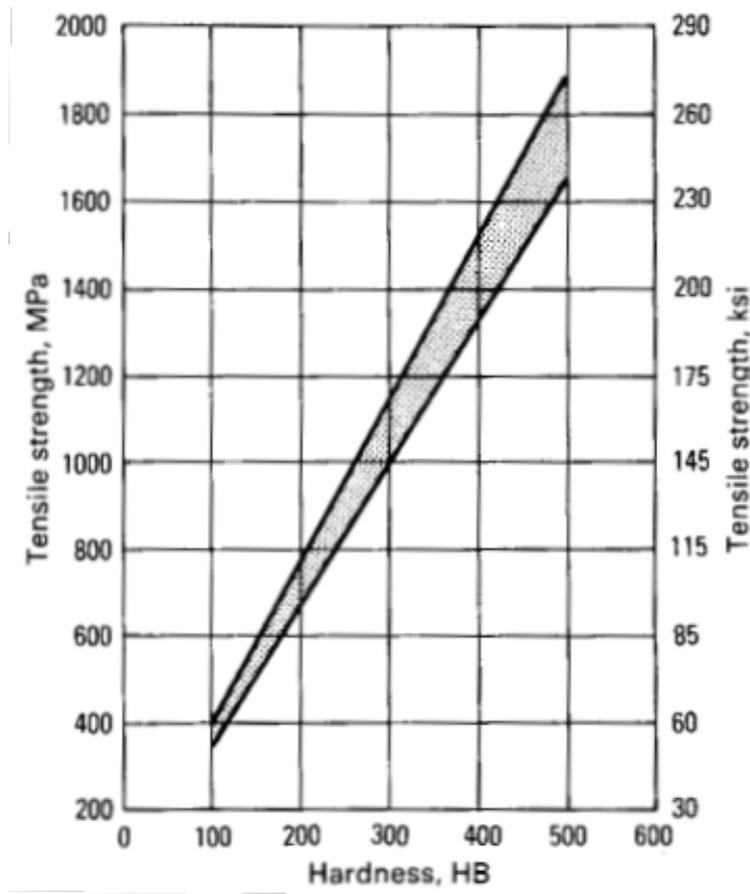


Figura 26 – Relação entre a dureza e o limite de tração no aço. Fonte: (AGGEN FRANK W. AKSTENS et al., 1990)

Montevecchi et al. (2016) compararam a diferença entre a dureza em um aço AISI H13 forjado e o mesmo material produzido por MADA e por Formato Final via Laser (LENS), o que é outro método de MA. A dureza medida nas duas peças produzidas por MA foram superiores à dureza da peça forjada. A dureza medida na peça forjada foi de 19 HRC, 59 HRC para a peça produzida por LENS e 55 HRC para a peça produzida por MADA. Essa diferença de dureza se deve a alteração microestrutural devido aos ciclos térmicos e faz aumentar os valores da força de usinagem para as peças obtidas por MA.

2.5.3.1 Ensaio de dureza Brinell

Existem diversos ensaios para obter a dureza de um objeto, os mais comuns são os ensaios de dureza Rockwell, Brinell, Knoop e Vickers (CALLISTER, 2000). Será dado foco ao ensaio de dureza Brinell, que será utilizado neste estudo.

Nos ensaios de dureza Brinell, um indentador esférico de aço endurecido é penetrado contra a superfície da peça a ser testada. O diâmetro dessa esfera é de 10,00 mm e as cargas padrões variam entre 500 e 3000 kg, com um incremento de 500 kg; durante

um ensaio, a carga é mantida constante durante um intervalo entre 10 e 30 s. O índice de dureza Brinell (HB) é uma função da magnitude da carga como do diâmetro da impressão da esfera na peça e o diâmetro é convertido ao número HB (CALLISTER, 2000). O valor da dureza Brinell é obtido seguindo a equação:

$$HB = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad (2.1)$$

Onde:

- HB é a dureza Brinell
- P é a carga aplicada em kg
- D é o diâmetro da esfera
- d é o diâmetro da calota

2.6 Usinagem de peças impressas

2.6.1 Peça usinada por fresamento tangencial

Conforme comentado, a MADA pode não garantir que a peça fique com as dimensões e o acabamento necessários para a operação da peça. Na figura 27 tem-se uma peça fabricada a partir de MADA (DVORAK et al., 2021), como a superfície após a deposição não tem um bom acabamento, a peça foi usinada por meio de uma fresadora CNC (Controle Numérico Computadorizado). Na figura 27 (a) pode-se ver como a superfície da amostra tem uma superfície rugosa e irregular, já em (b) pode-se ver o acabamento final obtido por meio da usinagem 27 (b).

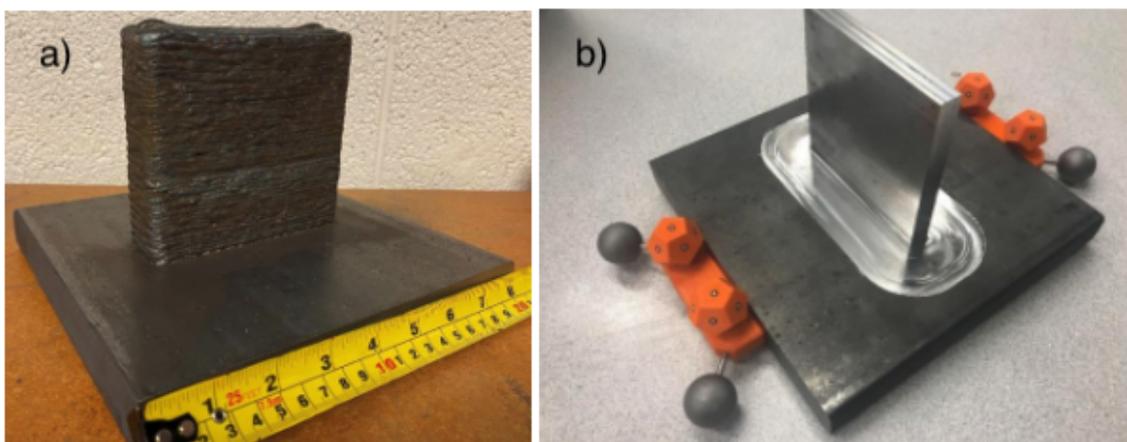


Figura 27 – Exemplo da peça antes (a) e depois (b) de serem usinadas. Fonte: (DVORAK et al., 2021)

Para conseguir esse acabamento, foi necessário programar a fresadora para que realize os passos adequados na amostra para obter o melhor acabamento possível, bem como selecionar os parâmetros de corte, que como mencionado, podem ser diferentes do que é apresentado na literatura para peças fundidas e forjadas. Para representar a importância da trajetória na forma final da peça, na figura 28 (a) se pode ver como o é a peça antes de ser usinada e na figura 28 (b) se pode observar o trajeto que a fresadora realizará para obter o acabamento superficial desejado.

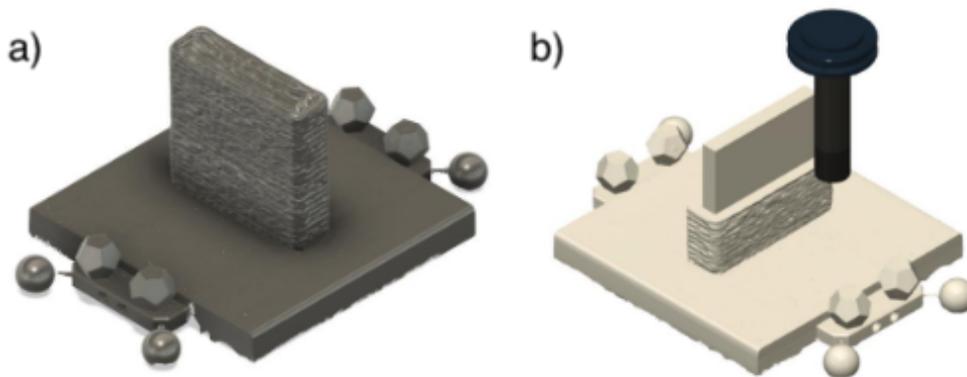


Figura 28 – Exemplo da peça no programa (a) e Exemplo do passo da fresadora no programa(b). Fonte: (DVORAK et al., 2021)

2.6.2 Acabamento superficial em peças impressas

O acabamento da superfície pode ser definido por três características, sendo elas a geometria superficial, a ondulação e a rugosidade da superfície. Dependendo do uso da peça impressa, o acabamento superficial pode ser crucial, uma vez que um acabamento adequado pode evitar a corrosão e/ou reduzir o atrito com outros componentes (3DEO, 2022).

Uma peça de metal obtida por manufatura aditiva tem varias opções possíveis para o acabamento. Essas opções vão depender da sua aplicação. Como cada peça tem um uso diferente, não existe um único método que proporcione um melhor acabamento para a superfície. O melhor acabamento será decidido pelo engenheiro de projeto, o qual entende as necessidades da peça (3DEO, 2022). Dessa forma, além do processo de fresamento, serão apresentados alguns outros métodos utilizados no acabamento. Esses acabamentos podem ser observados na figura 29. Segundo 3DEO (2022), esses acabamentos são:

- Jateamento - Produz um acabamento superficial suave sem afetar as tolerâncias dimensionais. Deixa um acabamento com uma rugosidade superficial R_a de aproximadamente (0,8-1,6 μm).
- Acabamento vibratório - Usado para arredondar as quinas.

- Polimento - Serve para deixar um acabamento superficial espelhado com baixa rugosidade ($0,3 \mu\text{m}$).
- Acabamento centrífugo - Utilizado para eliminar rebarbas de peças grandes e impurezas como oxidação superficial.
- Acabamento com nitrito preto - Tratamento químico que endurece o metal e produz um acabamento preto.
- Jateamento de granalhas (*Shot Peening Finish*, do inglês) - Tem como objetivo endurecer a superfície pela deformação plástica causada pelo impacto das granalhas no metal, modificando as propriedades mecânicas da superfície.

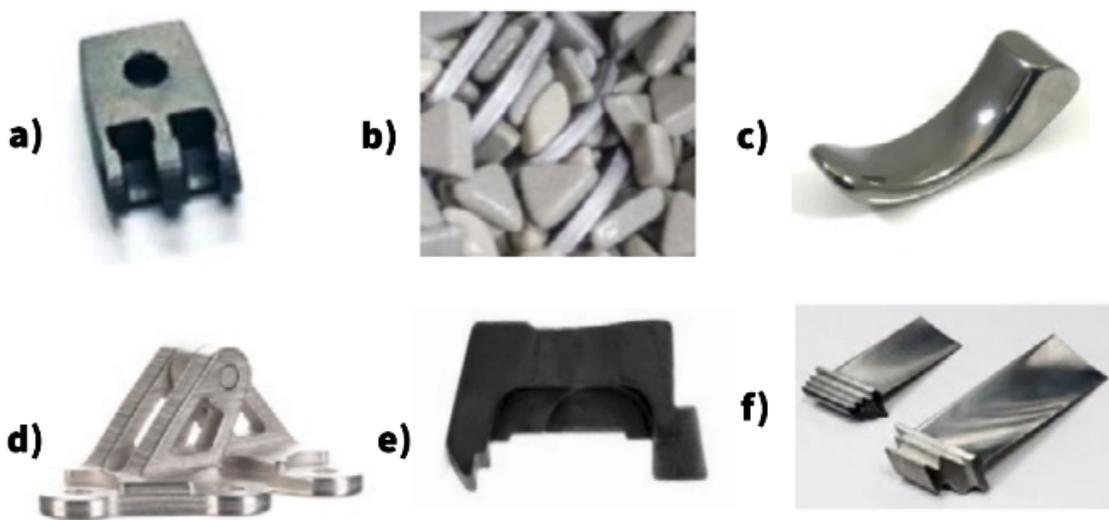


Figura 29 – Acabamento superficial por jateamento (a), acabamento vibratório (b), acabamento com polimento (c), acabamento centrífugo (d), acabamento com nitrito preto (e) e jateamento de granalhas (f). Fonte: (3DEO, 2022)

2.6.3 Usinagem em escala industrial

A empresa LASIMM (Large Additive Subtractive Integrated Modular Machine) é uma empresa que trabalha com a manufatura aditiva e com o acabamento final da peça fabricada. A empresa produz peças por MADA que podem ter um formato bem similar ao produto final. Nos exemplos apresentados na figura 29, as peças produzidas só precisavam melhorar o acabamento superficial. Por outro lado, na figura 30 pode-se observar como a peça, que também foi produzida por MADA, precisou de um processo pós usinagem para atingir as dimensões e geometrias além de realizar o acabamento, destacam-se os furos usinados na peça (LASIMM, 2017).

De acordo com a LASIMM (2017), a principal vantagem da produção por MADA é a redução de custo. A produção em escala com esse método, propicia uma redução em torno de 20% no tempo de produção e aumenta em 15% a produtividade, além de

reduzir o espaço necessário para as máquinas. A título de informação, pode-se ressaltar que produção dela não é restrita para peças em metal. A empresa é capaz produzir por manufatura aditiva de argila, como pode ser visto na figura 31, neste caso, a peça também necessita de pós processamento.



Figura 30 – Peça produzida por MADA e usinada por fresamento para obter o acabamento final. Fonte: (3DPRINTING, 2021)

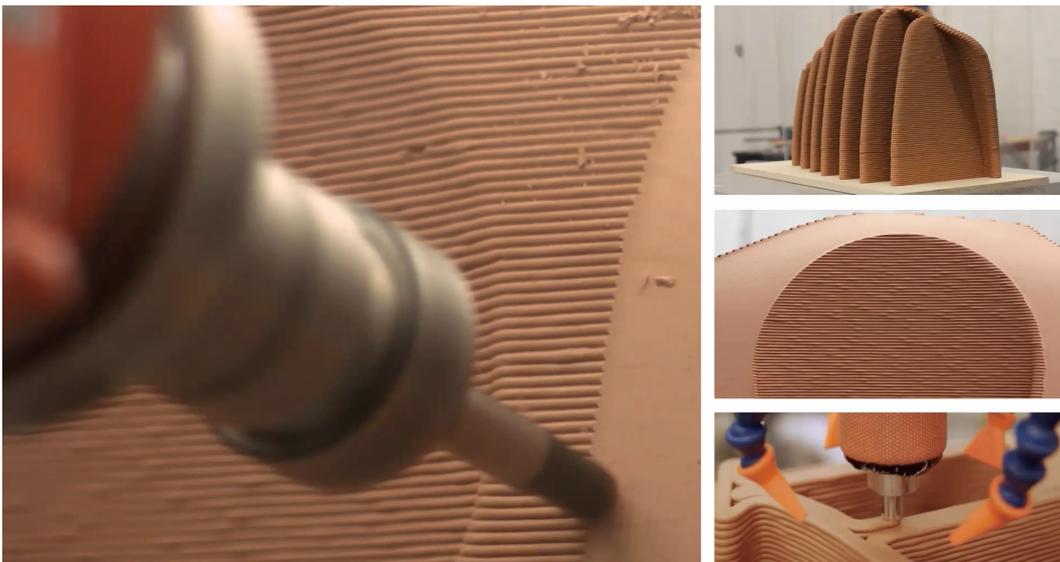


Figura 31 – Manufatura e usinagem de uma peça de argila . Fonte: (3DPRINTING, 2021)

2.6.4 Usinabilidade em peça produzida por MADA (GMAW e ER70S-6) com ferro fundido nodular

Dttmann e Gomes (2021) realizaram um experimento seguindo o fluxograma que se encontra na figura 32. No experimento foi utilizado o arame ER70S-6 e para a deposição o equipamento selecionado foi o braço robótico Kuka KR 16, como substrato foi utilizada uma base de ferro fundido nodular.

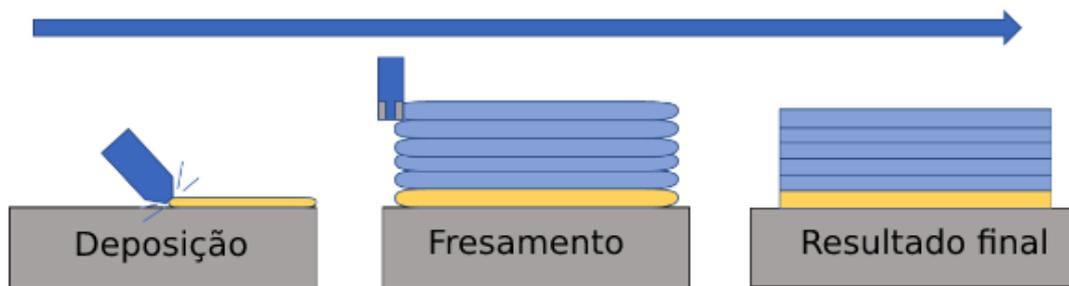


Figura 32 – Fluxograma do experimento de Dttmann e Gomes (2021)

O experimento consistiu em realizar dois tipos de deposições. Na figura 33 se pode observar o sentido que as camadas foram realizadas (A e B). A peça final produzida foi usinada, com fresamento tangencial, na fresadora CNC ROMI DCM 620-5X utilizando a ferramenta de corte Sandvick R390-11 T3 10M-KH 3040. No experimento o autor mediu as forças de usinagem utilizando a plataforma de piezoelétrico da Kistler e após o experimento, se realizou uma análise superficial.

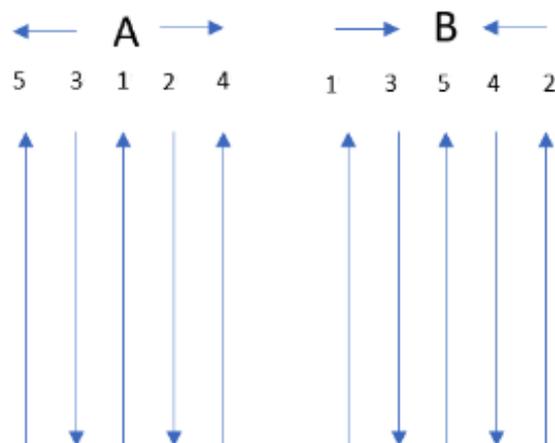


Figura 33 – Sequência de passes do experimento, adaptado de Dttmann e Gomes (2021)

A estrutura final da peça produzida, seguindo a sequência de deposição B, obteve uma estrutura com uma elevação central, em comparação com a sequência de deposição A. Essa elevação na estrutura B representa uma diferença de 5% na altura final da peça. Comparando a ondulação das duas peças, a peça produzida com a sequência A teve uma ondulação de $603 \pm 147 \mu\text{m}$ e para a peça produzida com a sequência B obteve uma ondulação de $631 \pm 178 \mu\text{m}$ (as medidas foram realizadas no perfil da seção transversal).

Após a deposição do material, o substrato deformou devido à contração causada pela transferência de calor não-homogênea, essa transferência de calor causou tensões residuais no substrato nas duas sequências. A média da diferença do tamanho final foi de 4 mm para a estratégia A e 6 mm para a estratégia B, essa deformação insinua que a estratégia B gera maior quantidade de tensão residual.



Figura 34 – Peça deformada produzida por Dttmann e Gomes (2021)

Dttmann e Gomes (2021) realizaram ainda ensaios com 3 velocidades de corte diferente, 175, 200 e 250 m/min. Dentre essas, a velocidade de corte a que gerou menos força foi a de 250 m/min, sendo essa força o resultado da força resultante nos vetores X, Y e Z, como se pode observar na equação 2.2. A velocidade de corte de 250 m/min, além de ter gerado menores forças resultantes, o que é esperado pela literatura, foi a que gerou menor rugosidade superficial.

$$F_r = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (2.2)$$

Conclui-se no trabalho que pela forma final da peça, teve-se tensão residual em um sentido de deposição. Além disso, a estratégia B teve uma maior tensão residual na peça, a força de corte diminui ao aumentar a velocidade de corte, as duas técnicas de deposição apresentaram um bom acabamento final, porém a estratégia A foi melhor (DTTMANN; GOMES, 2021).

2.6.5 Caracterização da integração entre a MADA e o processo de usinagem

Adebayo (2013) obteve as seguintes conclusões ao realizar a usinagem em peças fabricadas por MADA, neste estudo foi utilizado o eletrodo G3Si1 com o substrato S355J2+N laminado:

- A remoção da parede do substrato pode causar tensões significantes na peça e inclusive pode alterar a geometria física da parede. Essa tensão gerada na remoção da parede pode ser significante se a usinagem for realizada em paredes finas. Por outro lado, é melhor remover a peça antes de realizar o fresamento, pois, a usinagem da peça junto com o substrato pode causar mais dano no produto final.
- Existem 4 formas de paredes além da parede reta. Cada forma tem um efeito significante na usinabilidade. Na figura 35 se pode observar os 4 formatos mencionado.

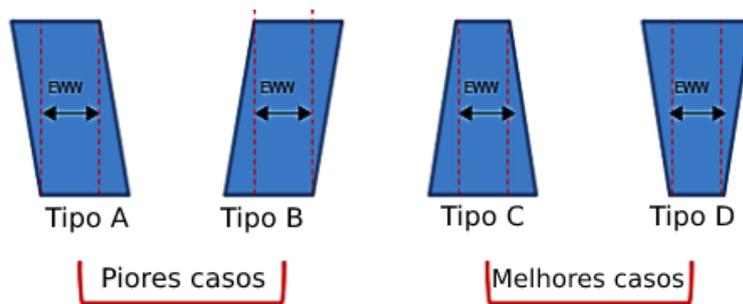


Figura 35 – Formatos de parede depositada, adaptado de Adebayo (2013)

Os dois piores tipos de paredes são o tipo A e B (figura 35). Isso se deve a que esses dois tipos exigem maior quantidade de remoção de material e quanto mais alta for a parede, há uma menor possibilidade de se atingir uma parede reta após a usinagem devido aos desvios da parede.

- Os parâmetros de deposição são a chave para controlar a espessura efetiva da parede, qualquer desvio significativo na deposição irá causar uma desviação no perfil da parede depositada, o que resulta no aumento de remoção de material, no desperdício e o aumento de custo de fabricação.
- O maior problema associado à usinagem de estruturas produzidas por MADA é a incapacidade de usinar peças com formas ocas.
- O uso de lubrificante na hora de usinar material produzido por MADA contamina a microestrutura dele pela introdução do lubrificante.
- Limpar a parede depositada com acetona durante o processo gera um endurecimento sequencial das amostras depositadas. A limpeza causou um aumento no tamanho do grão, conseqüentemente a redução da dureza do material.

Prado-Cerqueira et al. (2018) analisou a diferença entre uma MADA por MIG e por CMT com substrato de S235JR e o arame AWS ER70S-6. Após realizar o experimento medindo a dureza, a homogeneidade, a microestrutura e a resistência à tração do material, conclui-se que o processo CMT é a opção ideal, pois as propriedades mecânicas são melhores que a do MIG. Uma melhor propriedade mecânica se refere a ter um perfil de dureza homogêneo, resistências mecânicas mais perto da norma.

Já na pesquisa realizada por Zhang et al. (2019), foi utilizado o arame ER4043 com o substrato de AA1060-H112 (liga de alumínio). A parede foi produzida por CMT e depois foi usinada por fresamento. No experimento o autor alterou a profundidade de corte de 0,4 até 1,6 mm, aumentando de 0,4 em 0,4 mm. Se teve como conclusão de que para profundidade de corte entre 0,4 - 1,2 mm, a rugosidade superficial Ra ficou em média 58,5 μm , já para uma profundidade de corte de 1,6 mm a rugosidade Ra passou para 71,5 μm .

Tian et al. (2019) realizaram um estudo para ver como minimizar a rugosidade superficial em uma peça produzida por MADA seguida de pós-processamento. A pesquisa enfatizou na escolha do avanço por dente, a velocidade de corte e a temperatura da peça para um ótimo acabamento superficial numa peça produzida por MADA utilizando o arame AA2219 (liga de alumínio). O estudo conclui que combinando uma alta velocidade de corte e um baixo avanço por dente se consegue uma "rugosidade superficial satisfatória", o que vai de acordo com a literatura para usinagem de peças obtidas convencionalmente. Os autores mencionam ainda que foi observado que no começo, a rugosidade superficial incrementa e depois diminui com o aumento da temperatura da peça.

2.6.6 Análise no processo de usinagem para a liga de titânio Ti6Al-4V fabricado por MADA

Veiga et al. (2020) realizou uma pesquisa sobre uma peça de Ti6Al4V produzida por PAW-WAAM (Plasma Arc Welding) usinada por fresamento. Na pesquisa se realizaram três estratégias de fresamento. No primeiro ensaio foi realizado o fresamento tangencial concordante, no segundo foi com a fresa no sentido discordante e o terceiro foi um fresamento de topo.

Com base no estudo realizado, os autores obtiveram as seguintes conclusões:

- O limite elástico, a resistência à tração e o alongamento até a fratura tiveram valores superiores ao da peça produzida por manufatura tradicional.
- Em relação ao tipo de fresamento, o fresamento seguindo a direção concordante e o fresamento em sentido discordante apresentaram resistência à usinagem semelhantes porém o fresamento concordante deu um acabamento superficial superior.
- O torque não parece variar com a variação do a_p mas parece altamente sensível à velocidade de corte. O a_p afetou mais a qualidade superficial do corte, sendo assim, quanto menor for a distância entre a ferramenta e o sistema de fixação for, melhor é a qualidade superficial.

3 Materiais e Métodos

3.1 Metodologia

Para realizar o ensaio foi preciso preparar a peça. A preparação da peça consiste na separação dela do substrato e no desbaste de um lado da superfície da peça. Após o preparo da peça, foi possível dar início ao ensaio de usinagem. Com a peça usinada, foi feita a análise superficial da peça, tendo como objetivo analisar a presença de características típicas das superfícies usinadas como as marcas de avanço, trincas, poros, partes de aresta postiça de corte e partículas depositadas na superfície usinada. Também foi analisada a rugosidade superficial utilizando o rugosímetro, obtendo valores de Ra, Rq e Rz. Por último foi realizada análise e discussão dos resultados com as imagens da superfície usinada e com os valores de rugosidade obtidos. O ensaio foi realizado seguindo a sequência de etapas, que estão apresentadas no fluxograma da figura 36.

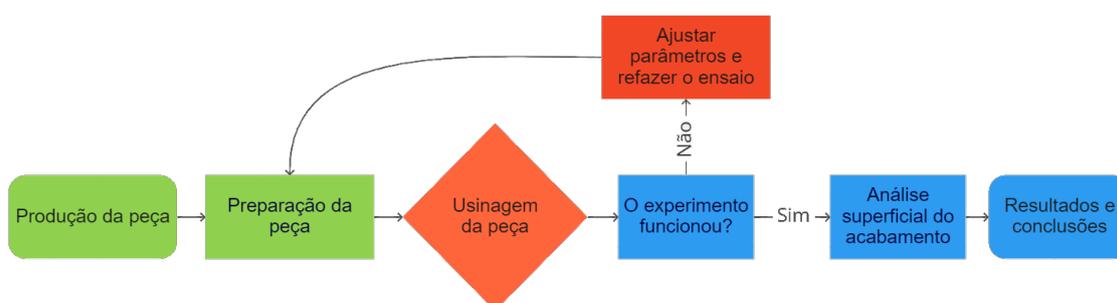


Figura 36 – Fluxograma das atividades.

3.2 Equipamentos e consumíveis

A peça a ser estudada foi fabricada por manufatura aditiva por deposição a arco, por Novelino (2021). A peça foi produzida utilizando o processo CMT convencional, utilizando o arame ER70S-6 como material de deposição e um substrato com 6,35 mm de espessura, utilizando um material compatível com o material de adição, o aço carbono 1020. A composição química do arame está apresenta na tabela 2, para mais informações sobre o arame, ver anexo A, Especificações do arame ER70S-6. A peça produzida por

Novelino (2021), utilizando o arame ER70S-6, seguiu os parâmetros médios da tabela 3.

Tabela 2 – Composição química típica do arame ER70S-6. Fonte: (BOHLER, 2022)

Composição química (%)		
Carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mn)
0,07	0,85	1,5

Tabela 3 – Parâmetros médios para a obtenção da peça de estudo com deposição bidirecional a arco contínuo. Fonte: (NOVELINO, 2021)

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de deposição vertical (mm/s)	Velocidade de deposição horizontal (mm/s)
62,0	20,6	2,6	24,0	8,0

O sistema utilizado por Novelino (2021) para realizar a deposição foi o Robô Cartesiano MAXR23R-S42-H42-C42 da Schneider Electric, apresentado na figura 37. O robô possui um volume de trabalho de X*Y*Z= 750x540x480 mm com resolução de 0,2 mm e com trajetória programada pelo código G (FERNANDES, 2016). A fonte utilizada foi a TransPuls Synergic 5000 CMT da *Fronius*, junto com um termômetro infravermelho digital KLX para o monitoramento da temperatura, com resolução de 0,10 °C e precisão de $\pm 1,50$ °C ajustado para emissividade de corpo negro (NOVELINO, 2021).

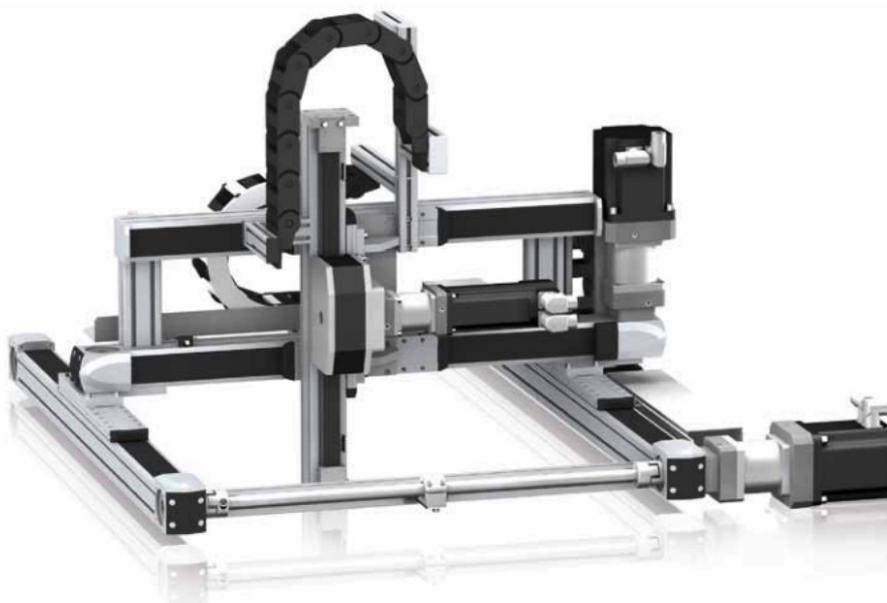


Figura 37 – Robô cartesiano MAXR23R-S42-H42-C42. Fonte: (ELECTRIC, 2009)

O arame de alimentação ER70S-6 de 1,20 mm de diâmetro foi utilizado junto com o gás de proteção, com a mistura de Ar + 18% CO_2 . A vazão do gás foi de 15 l/min. A deposição do arame foi bidirecional com arco contínuo pelo método de CMT convencional, formando uma parede vertical com 100 camadas.

A alimentação do sistema foi realizada pela fonte TransPuls Synergic 5000 CMT da *Fronius*. A figura 38 apresenta o equipamento com as indicações dos acessórios utilizados para a deposição do material. Na figura 39 se observa a peça produzida pelo robô cartesiano utilizando a fonte Transpuls.

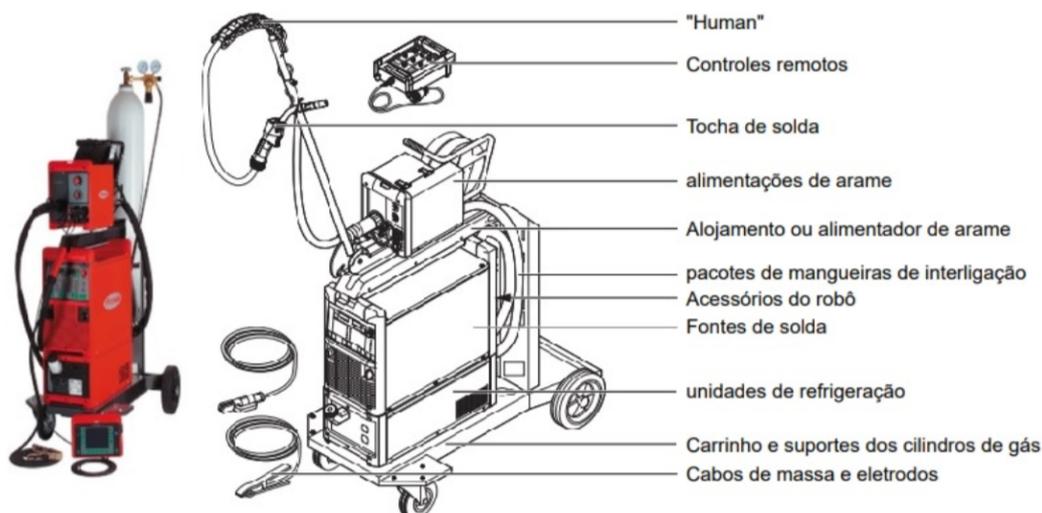


Figura 38 – Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT. Fonte: Adaptado de (FRONIUS, 2022)

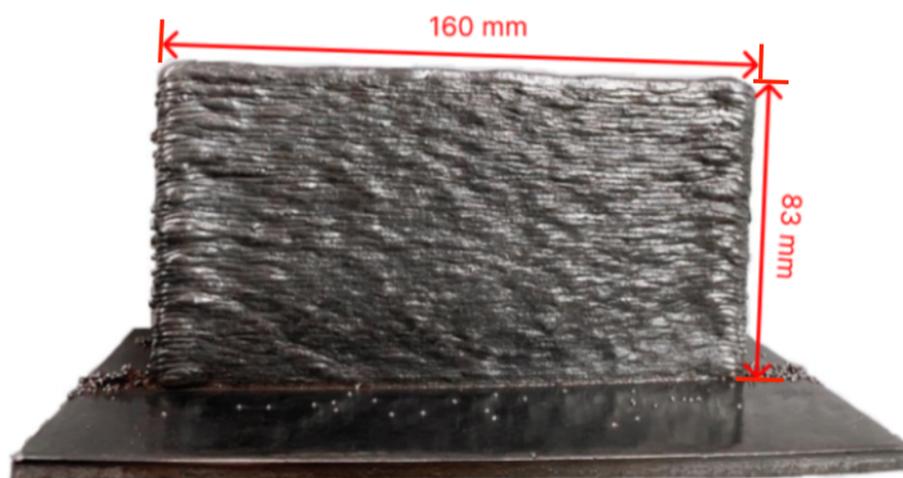


Figura 39 – Peça a ser estudada, produzida por Novelino (2021). Fonte: Adaptado de (BARRETO, 2022)

Para a realização da usinagem, foi utilizada a fresa Vonder HSS 5.0, ela possui as características que apresentam na tabela 4. A figura 40 apresenta a fresa que foi utilizada para o ensaio.

Tabela 4 – Características da fresa de topo. Fonte: (VONDER, 2022)

Diâmetro	5,0 mm
Medida da haste	6,0 mm
Comprimento útil	15,0 mm
Comprimento total	56,0 mm
Nº de cortes	4
Sentido de corte	Direita
Material	Aço rápido
Tipo de haste	Cilíndrica
Cobertura	Sem cobertura
Segue a norma	DIN 844



Figura 40 – Fresa de topo aço rápido Vonder HSS 5.0.

A fresa de aço rápido foi utilizada na fresadora CNC XH7132. A fresadora utilizada ser pode observar na figura 41. Especificações da máquina poderão ser encontradas no catálogo no anexo C: Especificações da Fresadora CNC Vega XH7132. Para poder operar a fresadora, foi preciso gerar um código G (ver anexo E , o qual é o código de programação que a máquina utiliza para usinar.



Figura 41 – Fresadora CNC Franho FM500.

3.3 Metodologia de preparação da peça

A preparação da peça foi a primeira etapa do estudo. Esta etapa consiste em separar a peça do substrato com a serra fita Franho FM500, como se pode ver na figura 42, mais informações sobre a serra fita podem ser obtidas no anexo D. A separação da peça foi realizada na parte com a linha tracejada na figura 43 e a figura 44 apresenta um esquema de como a peça é separada do substrato.



Figura 42 – Franho FM500. Fonte: (FRANHO, 2022)

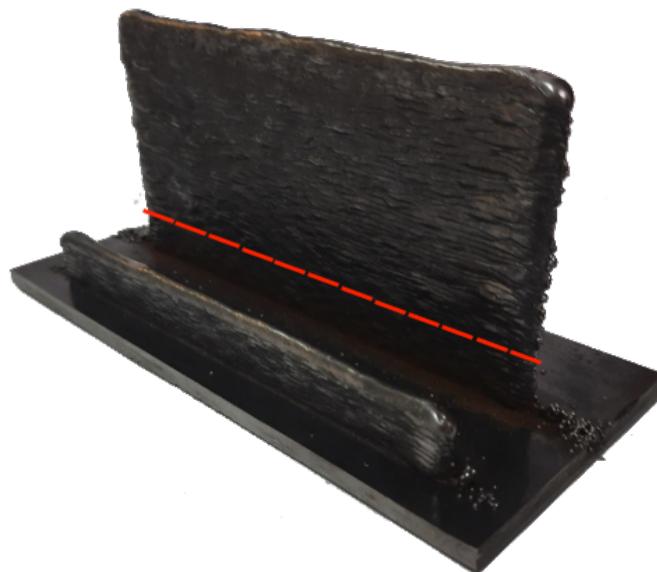


Figura 43 – Seção de corte entre o substrato e a peça.

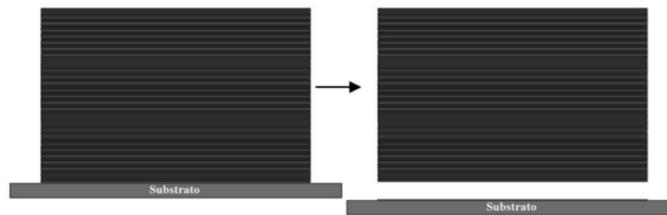


Figura 44 – Representação esquemática do processo de separação parede-substrato. Fonte: (PIMENTA, 2022)

3.4 Usinagem da peça e parâmetros de corte

Para analisar a influência da velocidade de corte no acabamento superficial da peça produzida por MADA, manteve-se constante os parâmetros de corte salvo o valor da velocidade de corte (V_c) e a velocidade de avanço (V_f). A velocidade de avanço foi variada para manter a velocidade de avanço por dente constante para todas as operações. O estudo da usinagem de peças produzidas por MADA consiste em realizar 5 canais na peça, cada canal modificando o valor de n e V_f .

Os parâmetros de cortes foram selecionados tendo em conta a revisão bibliográfica realizada. Os canais foram realizados no sentido perpendicular à direção de deposição do material, como se pode ver na figura 45. A tabela 5 apresenta as variáveis de entrada utilizadas nos ensaios de fresamento de topo na amostra. A tabela 6 apresenta os parâmetros de entrada utilizadas em cada canal, incluindo nas réplicas.

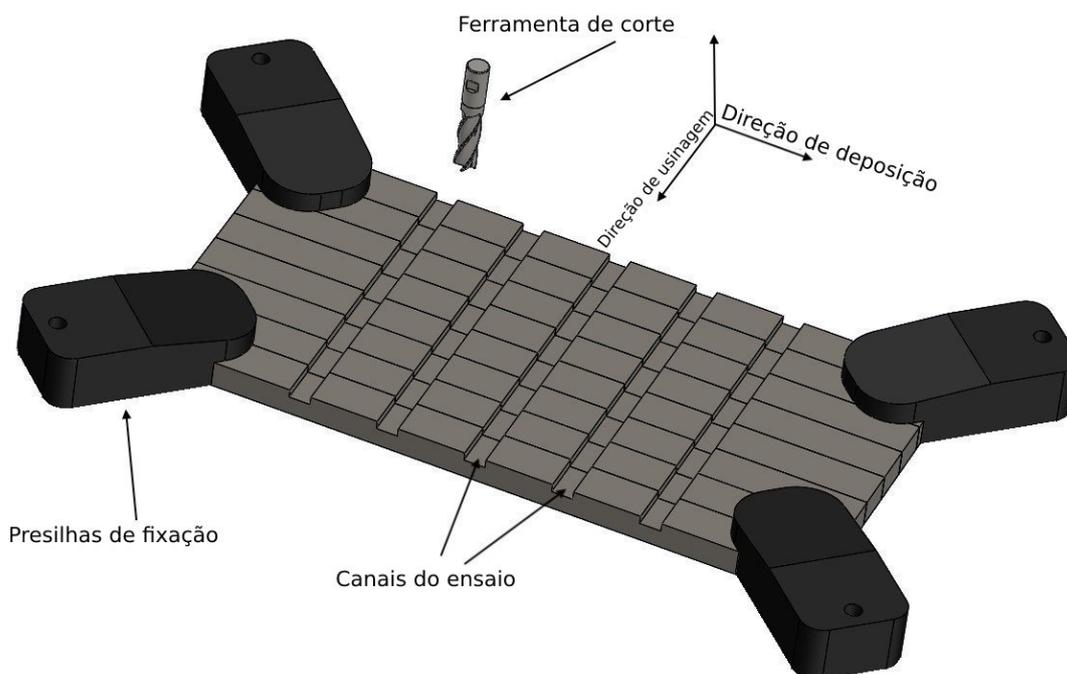


Figura 45 – Representação do processo de usinagem da peça na fresadora CNC.

Tabela 5 – Parâmetros de entrada utilizados nos ensaios de fresamento de topo

Parâmetro	Especificação
Velocidade de rotação (n)	637 - 3185 RPM
Velocidade de avanço (V_f)	63,7 - 318,5 mm/min
Velocidade de corte (V_c)	10 - 50 m/min
Número de dentes (z)	4
Avanço por dente (f_z)	0,025 mm/dente
Profundidade de corte (a_p)	0,50 mm
Fluido de corte	BIO100E (1:9)

Tabela 6 – Representação do processo de usinagem da peça na fresadora CNC.

Condição	Canal	Vc (m/min)	n (rpm)	Vf (mm/min)	fz (mm)	ap (mm)	ae (mm)
Ensaio	1	10	637	63,7	0,025	0,5	5
	2	20	1274	127,4			
	3	30	1911	191,1			
	4	40	2548	254,8			
	5	50	3185	318,5			
Réplica	6	10	637	63,7			
	7	20	1274	127,4			
	8	30	1911	191,1			
	9	40	2548	254,8			
	10	50	3185	318,5			

Foi utilizado o fluido de corte BIO100E para o fresamento. Este fluido é um óleo solúvel sintético específico para usinagem que, além de ser um bom lubrificante, não provoca manchas em metais (BIOLUB, 2017). Na aplicação, foi diluído numa proporção de 1:9 (1 litro de óleo para 9 litros de água), mais informações sobre o fluido de corte são apresentadas no anexo G. A figura 46 mostra o posicionamento da peça na fresadora CNC após a realização dos 10 canais de ensaio.

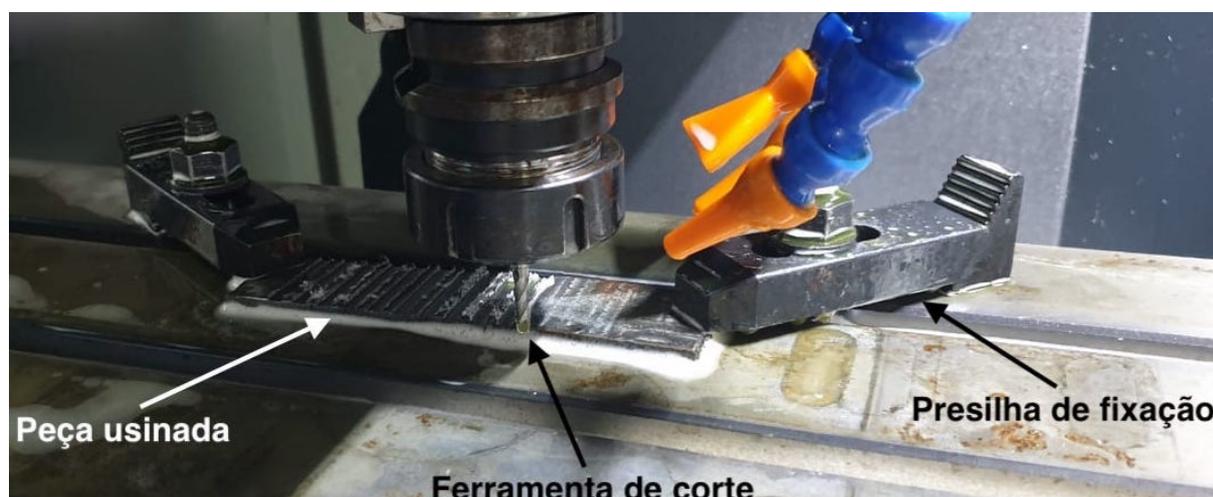


Figura 46 – Esquema da peça na fresadora

A peça a ser estudada foi usinada seguindo o sentido que se pode observar na figura 47. Lembrando que as dimensões peça da figura 47 são de $162 \pm 0,5$ mm de comprimento, $33 \pm 0,5$ mm de altura no ponto mais baixo, $40 \pm 0,5$ mm de altura no ponto mais alto e $7,26 \pm 0,94$ mm de espessura.

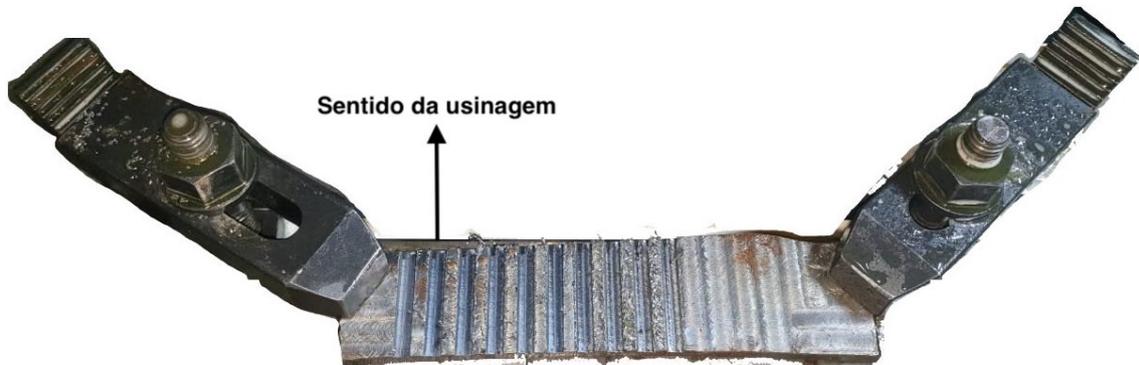


Figura 47 – Peça do estudo usinada

3.5 Análise superficial

Para a avaliação superficial por imagens na região usinada, foi utilizado o microscópio OLS4100 da marca *Olympus* (Figura 48), que possui um escâner digital capaz de observar e medir superfícies com valores de até 10 nanômetros de resolução (OLYMPUS, 2022). As imagens foram obtidas com intuito de avaliar a superfície dos canais, características qualitativas do fresamento e possíveis defeitos superficiais.



Figura 48 – Microscópio a ser utilizado. Fonte:(OLYMPUS, 2022)

3.5.1 Rugosidade

Durante a medição da rugosidade, existem diversos parâmetros que podem ser obtidos. Lista-se: o desvio aritmético médio (R_a), a altura média do perfil (R_z) e o desvio médio quadrático (R_q). As medições foram realizadas seguindo a Norma NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), com o *cut-off* de 0,8 mm, comprimento de amostragem de 4 mm com 5 repetições ($n=5$) e aplicando o filtro de Gauss. Os parâmetros escolhidos para a medição da rugosidade foram R_a , R_z e R_q para poder comparar os resultados obtidos da Barreto (2022) e assim ter uma referência na hora de comparar a rugosidade. Além de poder comparar com o resultado da Barreto (2022), segundo Chiffre et al. (2000) esses três parâmetros estão entre os principais parâmetros de rugosidade mais considerados na hora de avaliar a qualidade superficial usinada.

Na figura 49 pode-se observar como foi montado o sistema para poder obter os valores da rugosidade nos canais. Foram medidas as rugosidades no lado concordante e discordante do canal, a fim de se obter a condição de melhor acabamento. Para cada lado, foram realizadas 3 medições que serão apresentadas em termos das médias com desvio padrão. Vale ressaltar que as medições foram realizadas em ambiente com temperatura controlada, as amostras foram limpas antes das medições. Para avaliar a rugosidade superficial do canal, foi utilizado o rugosímetro portátil MITUTOYO MODELO SJ-201, que é um rugosímetro indicado para obter os parâmetros R_a , R_q , R_z , entre outros. Foi utilizado esse rugosímetro na montagem da figura 49.

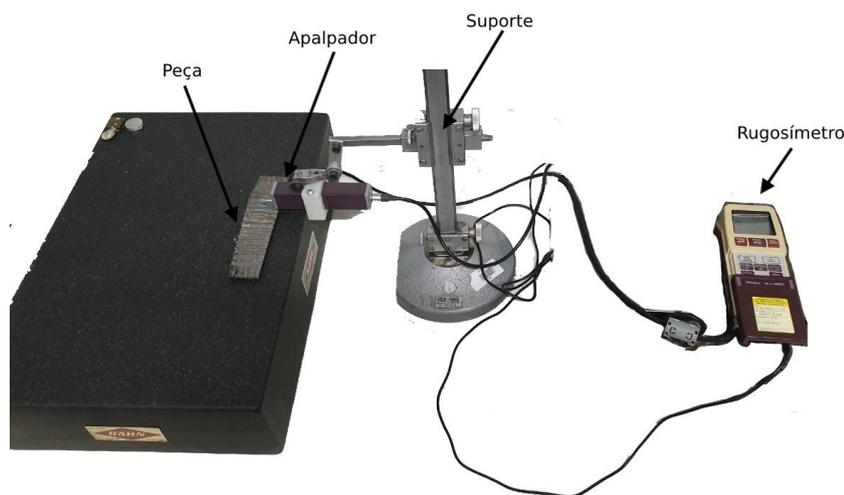


Figura 49 – Esquema do processo de obtenção de dados da rugosidade com o rugosímetro

3.5.2 Dureza

A análise de dureza tem por objetivo verificar se houve encruamento na superfície, ou alguma alteração devido às temperaturas durante o corte. Para medir a dureza, foi utilizado o durômetro Zwick Roell ZHU250 (figura 50), cujos dados podem ser lidos no anexo F. Para a medição da dureza da peça após o fresamento, foi utilizada a escala de dureza Brinell (HB) para poder comparar com o valor teórico que fica entre 100 - 200 HB.



Figura 50 – Durômetro Zwick Roell ZHU250. Fonte: (ZWICK/ROELL, 2022)

Seguindo os critérios para tomar a medição de dureza Brinell, Callister (2000) utilizou a norma ASTM E 10 para obter as medidas de dureza em um material metálico. Seguindo essa normal, utilizou-se os parâmetros da tabela 7.

Tabela 7 – Definições do teste de dureza

Definições do teste de dureza	
Unidade de dureza	Brinell
Diâmetro do indentador	1 mm
Passo da carga aplicada (HB)	10
Velocidade de aproximação	30,00 mm/min
Distância de aproximação	0,400 mm
Sensibilidade de contato	0,50 N
Carga de teste	294,21 N (30 kgf)
Velocidade de contato	5,00 mm/min
Tempo para chegar na carga	5,0 s
Tempo de carga aplicado	12 s

Como metodologia de medição foi adotado um valor de três medições por canal, sendo uma no começo, uma no meio e uma no final do canal. Foram também realizadas medições de dureza na região não usinada uma vez que é necessário um valor de referência para comparação. Os resultados serão apresentados também na forma de média com desvio padrão.

Nesta seção são apresentadas as imagens representativas de cada canal, os canais foram usinados com diferentes velocidades de corte, o avanço por dente foi mantido constante, para isso, a velocidade de avanço também foi variada. Na figura 51 pode-se observar o lado concordante, o lado discordante, o sentido de avanço da ferramenta de corte e o sentido de rotação da ferramenta. Todas as imagens representativas dos ensaios foram realizados com a mesma direção, então elas seguirão o sentido de avanço, de rotação da fresa indicados, bem como o posicionamento resultante dos lados concordante/discordante, deste modo, essas direções não serão especificadas em todas as imagens.

Em cada canal foram realizadas três medições de dureza e seis medições de rugosidade. Na medição da rugosidade teve-se em conta o sentido do corte, assim, foi medido no sentido concordante (conc.) e no sentido discordante (disc.) três vezes, em cada vez obtendo os valores de R_a , R_q e R_z . Não foi possível obter a medição da dureza nos dois sentidos devido ao tamanho do canal, deixando assim três medições na metade do canal.

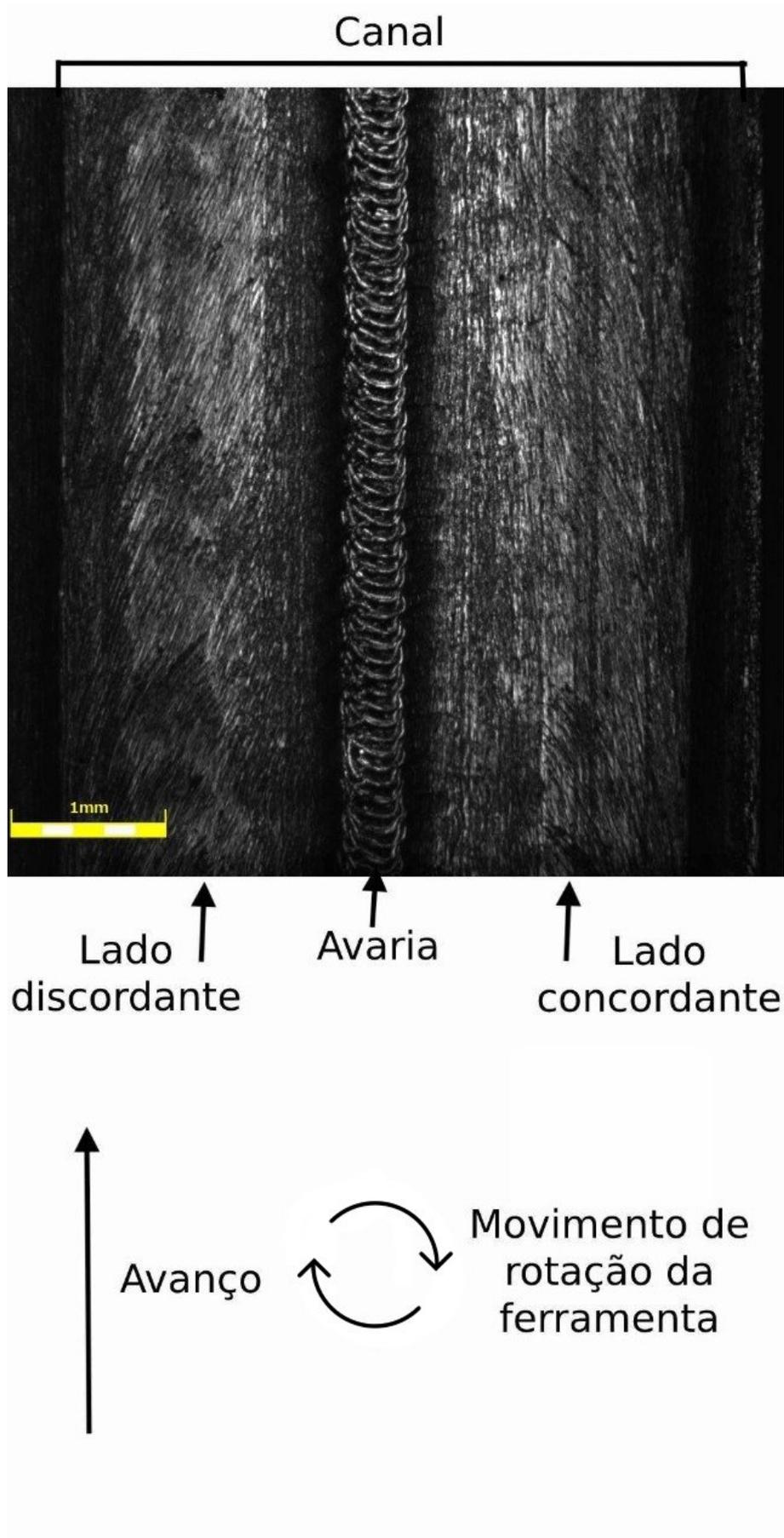


Figura 51 – Orientação da peça

4 Resultados e Discussões

4.1 Análise superficial

A figura 52 representa o acabamento superficial dos **canais 1 e 6** usinados com V_c de 10 m/min, sendo o canal 6 a réplica do canal 1. Os dois canais, comparando visualmente, apresentam um acabamento superficial bem similar, com poucas imperfeições visuais. Na tabela 8 se encontra a rugosidade superficial da peça (R_a , R_q e R_z) e a dureza dela (HB) junto com os seus desvios.

O canal 1 apresenta a menor rugosidade superficial dentre os 5 na parte concordante, tanto o desvio aritmético médio (R_a), o desvio médio quadrático (R_q) e a altura máxima do perfil (R_z). Na parte discordante, a R_z teve o menor valor, já o R_q e R_a tiveram o terceiro maior valor dentre os cinco canais. Na parte discordante podem-se observar imperfeições na figura 53, que também foram encontradas no canal 6. O canal 1 (figura 53 a) teve um menor valor de R_a em comparação ao canal 6 (figura 53 b), seguindo os dados da tabela 8 pode-se afirmar que o canal 1 possui um melhor acabamento superficial, porém, visivelmente não possuem um acabamento superficial diferenciado.

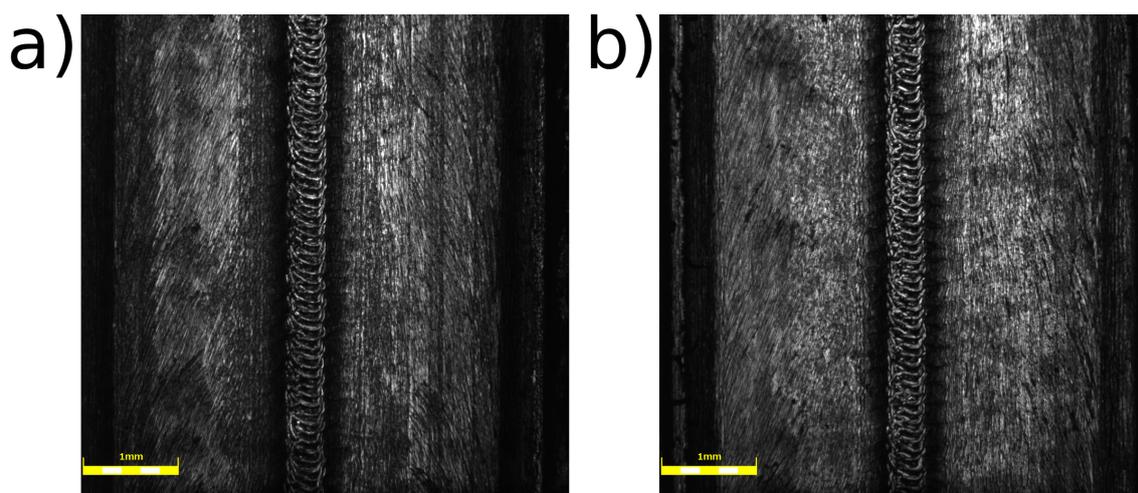


Figura 52 – a) Canal 1 e b) Canal 6 ($V_c = 10$ m/min)

Tabela 8 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 1 e canal 6 ($V_c = 10$ m/min)

		Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Dureza (HB)
Canal 1	Disc.	$0,21 \pm 0,05$	$1,21 \pm 0,12$	$0,26 \pm 0,05$	$135,0 \pm 6,83$
	Conc.	$0,11 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,12$	$0,14 \pm 0,02$	
Canal 6	Disc.	$0,26 \pm 0,10$	$1,53 \pm 0,20$	$0,33 \pm 0,12$	$158,7 \pm 13,01$
	Conc.	$0,20 \pm 0,02$	$1,07 \pm 0,23$	$0,24 \pm 0,03$	

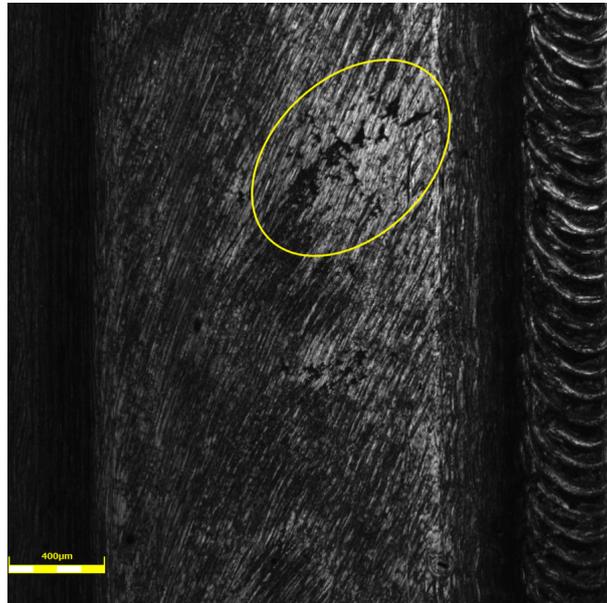


Figura 53 – Imperfeições formadas por movimento concordante no canal 1 ($V_c = 10$ m/min)

A figura 54 representa o acabamento superficial dos **canais 2 e 7** usinados com a V_c de 20 m/min, sendo o canal 7 a réplica do canal 2. Na tabela 9 se encontra a rugosidade superficial da peça (Ra, Rq e Rz) e a dureza dela (HB) junto com os seus desvios.

O canal 2 apresenta o maior valor para Rq tanto no concordante como no discordante, o maior valor para Ra discordante, o terceiro maior valor para Ra concordante e Rz discordante, e por último, o quarto maior valor para Rz concordante. Na figura 55 se pode observar como em ambos os lados do canal, que foi formado por movimentos concordantes e discordantes, percebe-se um possível arrancamento de material na superfície usinada, marcados em amarelo.

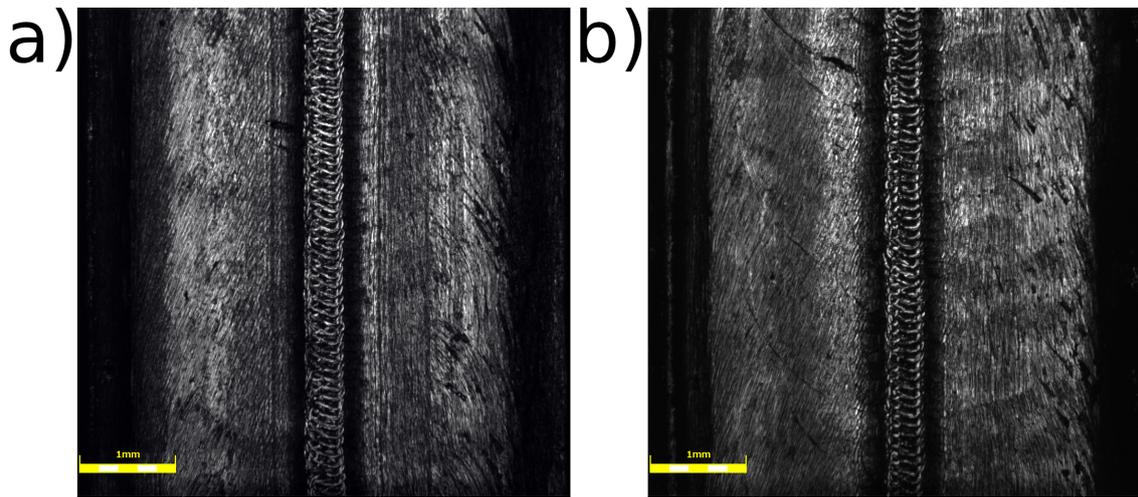


Figura 54 – a) Canal 2 e b) Canal 7 ($V_c = 20$ m/min)

Tabela 9 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 2 e canal 7 ($V_c = 20$ m/min)

		Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Dureza (HB)
Canal 2	Disc.	$0,24 \pm 0,05$	$1,26 \pm 0,16$	$0,29 \pm 0,05$	$145,3 \pm 10,87$
	Conc.	$0,19 \pm 0,01$	$1,08 \pm 0,08$	$0,23 \pm 0,01$	
Canal 7	Disc.	$0,19 \pm 0,08$	$1,11 \pm 0,50$	$0,25 \pm 0,13$	$151,7 \pm 16,86$
	Conc.	$0,30 \pm 0,04$	$1,51 \pm 0,27$	$0,37 \pm 0,06$	

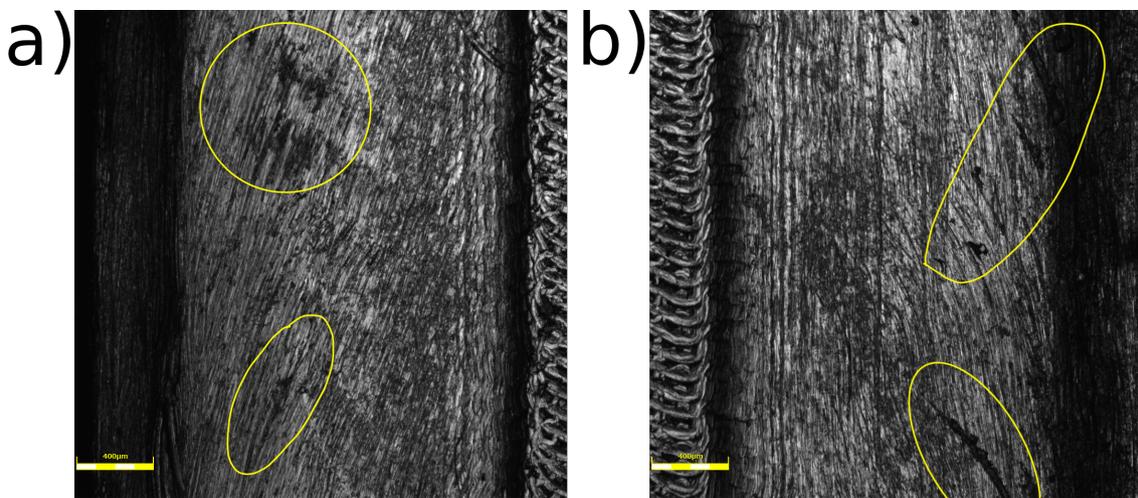


Figura 55 – Canal 2 a) Parte do canal formado por movimento discordante e b) Parte do canal formado por movimento concordante com sinalização nas imperfeições

A figura 56 representa o acabamento superficial dos **canais 3 e 8** usinados com a velocidade de corte V_c de 30 m/min, sendo o canal 8 a réplica do canal 3. Na tabela 10 se encontra a rugosidade superficial da peça (Ra, Rq e Rz) e a dureza dela (HB) junto com os seus desvios.

O canal 3 apresenta o maior valor de Rq no sentido discordante, o quarto maior valor no Ra e Rq no sentido discordante e por último, apresenta o terceiro maior valor

para o Rz e Rq no sentido concordante. Na figura 57 se pode observar como no canal que foi formado por movimentos concordantes e discordantes percebe-se um possível arrancamento de material na superfície usinada. O canal 3 apresenta uma maior quantidade de arrancamento de material na superfície usinada em comparação com os canais 1 e 2, além disso, foi possível observar porosidade no canal.

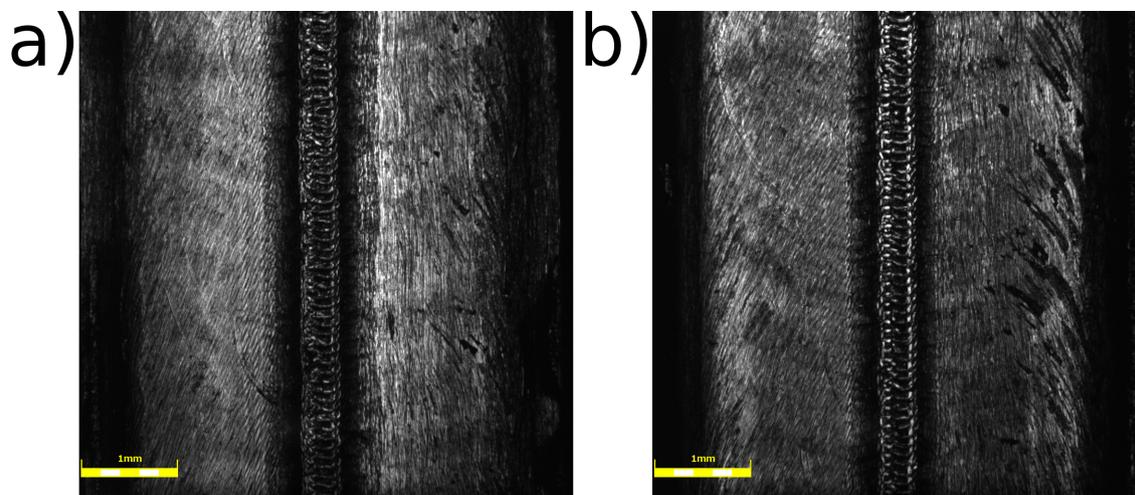


Figura 56 – a) Canal 3 e b) Canal 8 ($V_c = 30$ m/min)

Tabela 10 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 3 e canal 8 ($V_c = 30$ m/min)

		Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Dureza (HB)
Canal 3	Disc.	$0,22 \pm 0,05$	$1,38 \pm 0,37$	$0,28 \pm 0,06$	$153,9 \pm 6,88$
	Conc.	$0,19 \pm 0,02$	$1,20 \pm 0,13$	$0,24 \pm 0,03$	
Canal 8	Disc.	$0,34 \pm 0,09$	$1,60 \pm 0,06$	$0,40 \pm 0,09$	$167,2 \pm 19,69$
	Conc.	$0,33 \pm 0,06$	$1,92 \pm 0,50$	$0,41 \pm 0,09$	

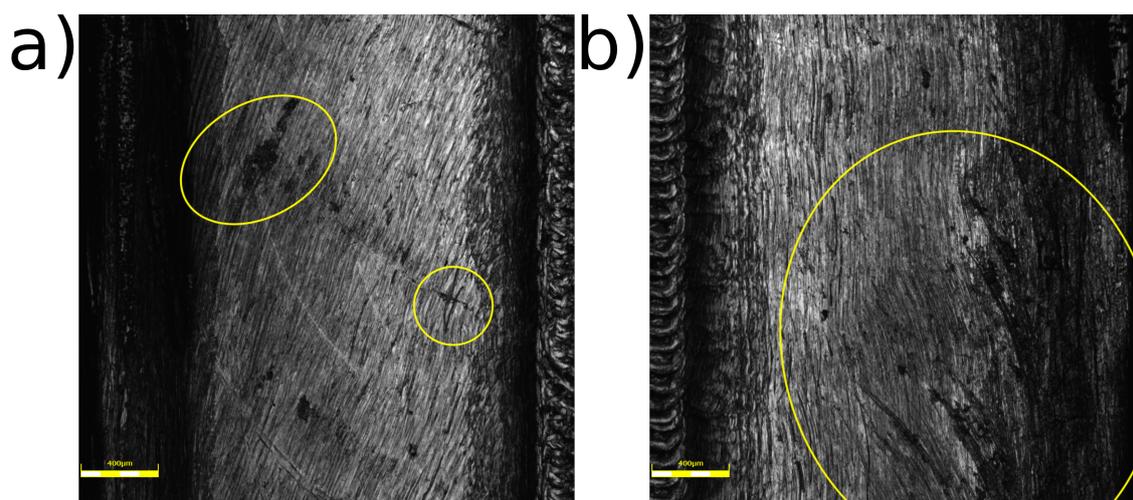


Figura 57 – Canal 3 a) Parte do canal formado por movimento discordante e b) Parte do canal formado por movimento concordante com sinalização nas imperfeições

A figura 58 representa o acabamento superficial dos **canais 4 e 9** usinados com a V_c de 40 m/min, sendo o canal 9 a réplica do canal 4. Na tabela 11 se encontra a

rugosidade superficial da peça (R_a , R_q e R_z) e a dureza dela (HB) junto com os seus desvios.

O canal 4 apresenta o menor valor de R_a e R_q no sentido discordante, já o valor de R_a , R_z e R_q no sentido concordante tiveram o segundo maior valor e por último, o R_z no sentido discordante foi o segundo menor valor dentre os cinco canais. Na figura 59 se podem observar as irregularidades causadas no canal que foi formado por movimentos concordantes e discordantes. Dentro dos cinco canais, foi o canal que visivelmente foi o pior, apresentando maior quantidade de possível arrancamento de material pela fresa e também apresentando certa quantidade de poros dentro do canal.

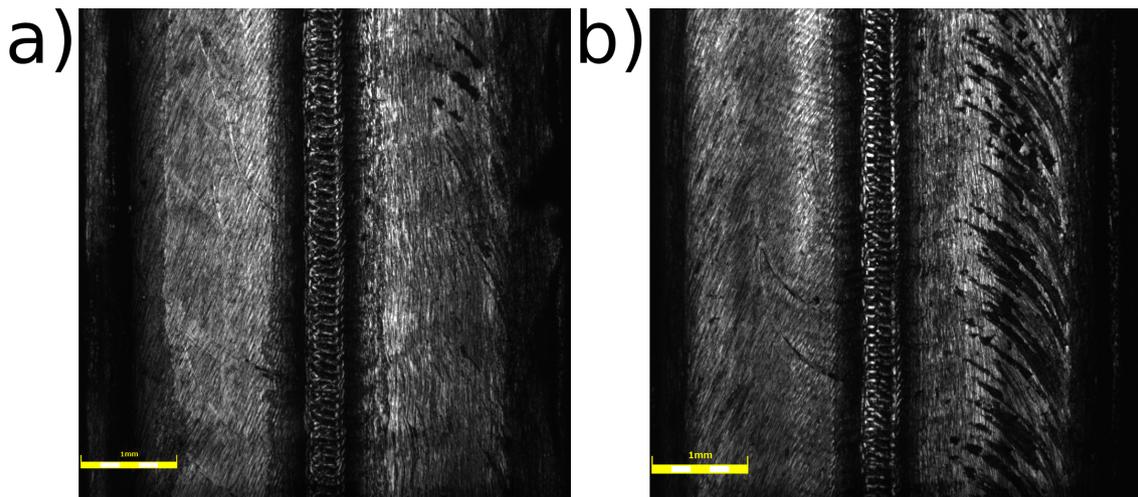


Figura 58 – a) Canal 4 e b) Canal 9 ($V_c = 40$ m/min)

Tabela 11 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 4 e canal 9 ($V_c = 40$ m/min)

		R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)	Dureza (HB)
Canal 4	Disc.	$0,18 \pm 0,01$	$1,25 \pm 0,09$	$0,23 \pm 0,01$	$131,9 \pm 14,50$
	Conc.	$0,25 \pm 0,01$	$1,52 \pm 0,10$	$0,32 \pm 0,00$	
Canal 9	Disc.	$0,28 \pm 0,07$	$1,79 \pm 0,11$	$0,35 \pm 0,07$	$145,1 \pm 10,88$
	Conc.	$0,42 \pm 0,02$	$2,01 \pm 0,10$	$0,50 \pm 0,02$	

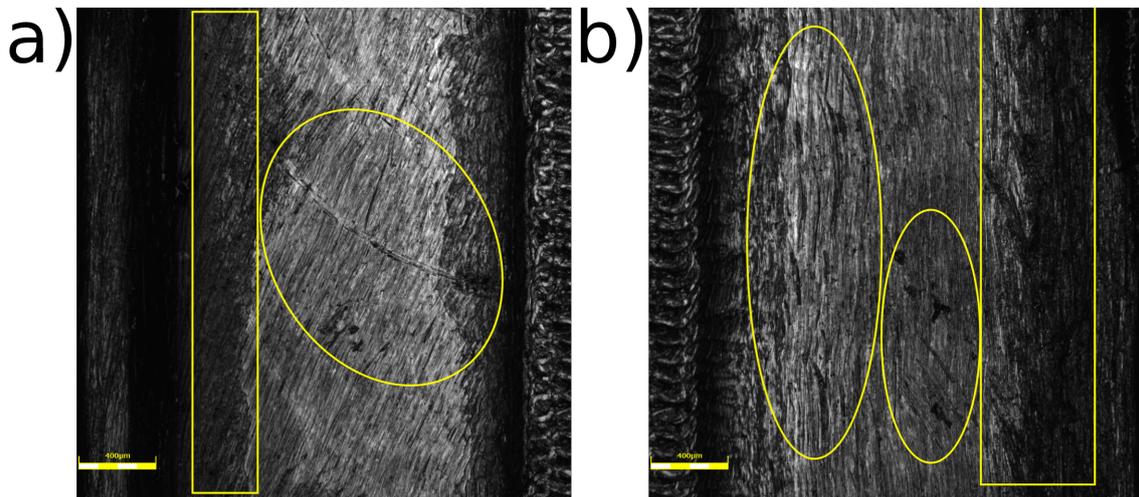


Figura 59 – Canal 4 a) Parte do canal formado por movimento discordante e b) Parte do canal formado por movimento concordante com sinalização nas imperfeições

No presente estudo foi possível comprovar, utilizando o microscópio, a presença de poros nos canais, similares aos obtidos por Nemani, Ghaffari e Nasiri (2020) que utilizou o mesmo arame, o que é esperado em uma peça produzida por MADA. Ron et al. (2020) realizaram um estudo analisando a microestrutura do arame ER70S-6 encontrando porosidade de 0,15 % a 0,08 % de impurezas e 0,04 % de falta de fusão.

Segundo Norma ISO 6520-1 (ISO, 1998), pode-se formar poros por gás dentro da solda ou por dentro do cordão depositado. Pode-se considerar como defeitos os poros que forem uniformemente distribuídas ao longo da solda, porosidade em algum local concentrado dentro da solda e inclusive uma coluna de gás de poros situados paralelas ao eixo da solda. Para classificar os poros, teve-se em conta a Norma ISO 5871 (ISO, 2003) (que utiliza a Norma ISO 6520-1 (ISO, 1998) como referência). Segundo elas, para poder considerar como defeito, é preciso ter uma quantidade de poros distribuídos superior a 1 %, o qual seguindo os resultados do Ron et al. (2020) nos mostra que são inferiores que isso, ou seja, está dentro do limite de imperfeições para uma qualidade de nível B (melhor qualidade).

Seguindo a porcentagem de porosidade obtida por Ron et al. (2020) e tendo em conta a Norma UNE-EN ISO 5817 (ISO, 2003), não se pode considerar essa porosidade como um defeito nesta peça. No caso dos canais apresentados, esta pode ser uma hipótese para a presença de vazios, que são possíveis poros, no entanto, estes vazios podem também ser provenientes de arrancamentos de material durante o processo de fresamento.

A figura 60 representa o acabamento superficial dos **canais 5 e 10** usinados com a V_c de 50 m/min, sendo o canal 10 a réplica do canal 5. Na tabela 12 se encontra a rugosidade superficial da peça (R_a , R_q e R_z) e a dureza dela (HB) junto com os seus desvios.

O canal 5 apresenta o maior valor de R_a , R_z e R_q no sentido concordante, o

segundo maior valor no Rz discordante e segundo menor valor em Ra e Rq no sentido discordante. Na figura 61 se podem observar as falhas causadas no canal que foi formado por movimentos concordantes e discordantes. Dentro dos cinco canais, foi o segundo canal que qualitativamente (análise visual) foi o pior.

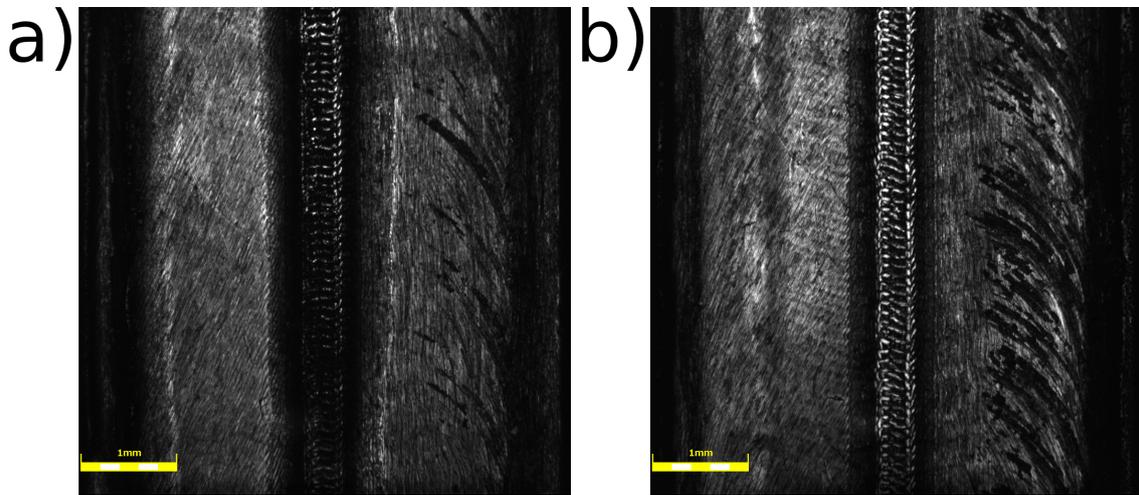


Figura 60 – a) Canal 5 e b) Canal 10 ($V_c = 50$ m/min)

Tabela 12 – Valores da rugosidade e da dureza do canal 5 e canal 10 ($V_c = 50$ m/min)

		Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Dureza (HB)
Canal 5	Disc.	$0,19 \pm 0,01$	$1,30 \pm 0,10$	$0,24 \pm 0,002$	$158,3 \pm 10,42$
	Conc.	$0,26 \pm 0,05$	$1,56 \pm 0,20$	$0,35 \pm 0,07$	
Canal 10	Disc.	$0,25 \pm 0,01$	$1,53 \pm 0,12$	$0,30 \pm 0,01$	$147,8 \pm 4,39$
	Conc.	$0,37 \pm 0,03$	$2,51 \pm 0,48$	$0,47 \pm 0,03$	

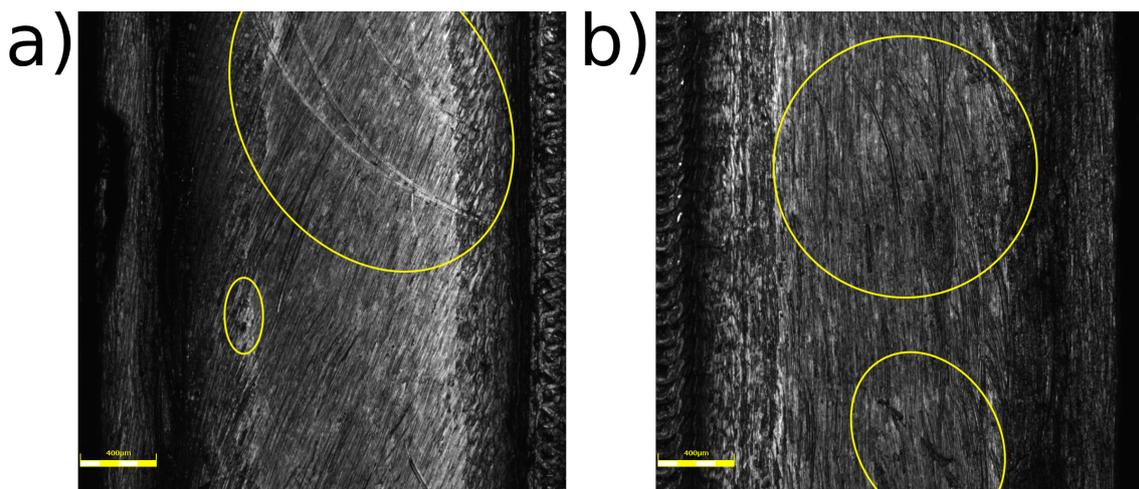


Figura 61 – Canal 5 a) Parte do canal formado por movimento discordante e b) Parte do canal formado por movimento concordante com sinalização nas imperfeições

Pela análise superficial utilizando o microscópio, foi possível encontrar imperfeições como porosidade e possível arrancamento de material ocasionado pelo fresamento.

Dentre os cinco canais, o canal 1 (canal com $V_c = 10$ m/min) foi o canal que teve menos imperfeições visuais. Tendo em conta a teoria, era previsto encontrar porosidade no meio dos canais. O canal 4 (canal com $V_c = 40$ m/min) foi o que apresentou maior quantidade de imperfeições visuais.

Pela análise superficial utilizando o rugosímetro, foi possível observar como o canal 1 obteve um menor valor de Ra, Rz e Rq médio entre o valor do corte no sentido discordante e concordante, com a média de $Ra = 0,163 \mu\text{m}$, $Rz = 0,960 \mu\text{m}$ e $Rq = 0,200 \mu\text{m}$. Já o canal com a maior quantidade imperfeições visuais, o canal 4, obteve menor valor de Ra, Rz e Rq em comparação ao canal 5, porém, pior valor entre os canais 1, 2 e 3. Na réplica os valores de Ra, Rq e Rz de todos os canais foram maiores por um possível desgaste da ferramenta. Apesar disso, a réplica dos canais 3, 4 e 5 continuam apresentando os piores resultados e a réplica do canal 1 continua apresentando o melhor resultado.

Os melhores valores de rugosidade foram encontrados aplicando uma menor velocidade de corte. Na teoria, quando aumentava a velocidade de corte faz com que a temperatura do material aumente e cause a redução na resistência mecânica do material e assim deveria facilitar a usinagem, porém, no ensaio foi possível comprovar que isso não se aplicou na peça produzida por MADA.

No trabalho realizado por Barreto (2022), que foi realizado com o mesmo material e o mesmo método de fabricação da amostra, conclui-se que o melhor acabamento superficial, dentre os medidos, ocorre quando utiliza um avanço por dente de $0,020$ mm/dente. A autora obteve uma rugosidade $Ra_d = 0,340 (\mu\text{m})$, $Ra_c = 0,230 (\mu\text{m})$, sendo Ra_d a o desvio aritmético médio no sentido discordante e Ra_c o desvio aritmético médio no sentido concordante. Em comparação com os resultados obtidos neste trabalho, o melhor canal foi o canal 1 com um $Ra_c = 0,11 (\mu\text{m})$ e $Ra_d = 0,21 (\mu\text{m})$. Comparando então com os resultados de Barreto (2022) pode-se verificar que o sentido de corte concordante produz um melhor acabamento na superfície da peça analisada.

O acabamento superficial obtido em todos os ensaios foram melhores do que o acabamento superficial realizado por polimento, o qual possui uma rugosidade aproximada de $0,5 \mu\text{m}$ (BAPTISTA; SIMOES, 2000). Segundo Baptista e Simoes (2000), uma superfície com uma rugosidade $Ra = 1,0 (\mu\text{m})$ está em um nível de rugosidade "aceitável", porém requer um polimento manual e uma rugosidade de $Ra = 0,5 (\mu\text{m})$ é uma rugosidade equivalente ao polimento manual. Com isso em mente, pode-se afirmar que o resultado obtido no fresamento foi aceitável para considerar-se como um bom acabamento. Lembrando que a superfície da peça antes de ser usinada tinha um nível de rugosidade de $Ra = 5,8 (\mu\text{m})$ e abaixou para $Ra = 0,11 (\mu\text{m})$ no canal que foi realizado com uma V_c de 10 m/min (ver apêndice 67).

Em relação às imperfeições observados nas superfícies dos canais, vale ressaltar que a MADA é conhecida por ter uma microestrutura heterogênea e propriedades mecânicas

anisotrópicas que podem ser minimizados com um pós-tratamento térmico. Essa é uma das maiores desvantagens da MADA em comparação com o método de fabricação convencional. Além da microestrutura heterogênea, a formação interna de imperfeições entre cada camada depositada como resultado de uma grande dissipação de calor pode deteriorar as propriedades mecânicas da peça. Essas imperfeições podem ser gás aprisionado, porosidades e falta de fusão do material. Essas imperfeições podem atuar como concentrador de tensão e favorecer a propagação de trincas (NEMANI; GHAFARI; NASIRI, 2020) o que pode ser acentuado durante a usinagem.

Para obter os valores da rugosidade nos canais, foram realizadas três medições em cada sentido de corte para cada canal sendo que em cada medição o rugosímetro mede os parâmetros de R_a , R_q e R_z . Os parâmetros para tomar a medida da dos canais foram aplicando um *cut-off* de 0,8 mm com 5 repetições, como foi visto na revisão bibliográfica. A rugosidade foi medida em um ambiente com temperatura controlada, com uma temperatura ambiente de 24°C e uma umidade relativa de 83%. A tabela 13 apresenta o valor médio obtido para cada parâmetro e a tabela 14 apresenta os valores das réplicas, lembrando que o canal 6 é a réplica do canal 1, seguindo até o canal 10, que é a réplica do canal 5. Para cada média da amostra foi calculado um desvio padrão (DP) dos valores. Com esses valores foram criados gráficos para uma melhor visualização dos dados.

Tabela 13 – Valores obtidos para R_a , R_z e R_q

	Sentido de corte	R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)
Canal 1	Discordante	0,21	1,21	0,26
	DP	0,05	0,12	0,05
	Concordante	0,11	0,72	0,14
	DP	0,01	0,12	0,02
Canal 2	Discordante	0,24	1,26	0,29
	DP	0,05	0,16	0,05
	Concordante	0,19	1,08	0,23
	DP	0,01	0,08	0,01
Canal 3	Discordante	0,22	1,38	0,28
	DP	0,05	0,37	0,06
	Concordante	0,19	1,20	0,24
	DP	0,02	0,13	0,03
Canal 4	Discordante	0,18	1,25	0,23
	DP	0,18	1,25	0,23
	Concordante	0,25	1,52	0,32
	DP	0,01	0,10	0,00
Canal 5	Discordante	0,19	1,30	0,24
	DP	0,01	0,10	0,02
	Concordante	0,26	1,56	0,35
	DP	0,05	0,20	0,07

Tabela 14 – Valores da réplica obtidos para R_a , R_z e R_q

	Sentido de corte	R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)
Canal 6	Discordante	0,26	1,53	0,33
	DP	0,10	0,20	0,12
	Concordante	0,20	1,07	0,24
	DP	0,02	0,23	0,03
Canal 7	Discordante	0,19	1,11	0,25
	DP	0,08	0,50	0,13
	Concordante	0,30	1,51	0,37
	DP	0,04	0,27	0,06
Canal 8	Discordante	0,34	1,60	0,40
	DP	0,09	0,06	0,09
	Concordante	0,33	1,92	0,41
	DP	0,06	0,50	0,09
Canal 9	Discordante	0,28	1,79	0,35
	DP	0,07	0,11	0,07
	Concordante	0,42	2,01	0,50
	DP	0,02	0,10	0,02
Canal 10	Discordante	0,25	1,53	0,30
	DP	0,01	0,16	0,01
	Concordante	0,37	2,51	0,47
	DP	0,03	0,47	0,03

A partir dos dados das tabelas 13 e 14 foi possível gerar os gráficos da figura 62, 63 e 64. Cada gráfico mostra os dez canais com a rugosidade no sentido de corte concordante (azul) e no sentido de corte discordante (vermelho), ao mesmo tempo apresenta os 10 canais, ou seja, com as réplicas. Para as réplicas se utilizou uma linha tracejada e cada velocidade de corte diferente se utilizou uma cor de fundo diferente para facilitar a visualização.

Com o gráfico da figura 62 pode-se observar os valores do R_a , comprovando-se que para o canal usinado com a V_c de 10 m/min tem o menor valor, sendo assim a média de 0,160 μm e 0,230 μm na réplica. Os piores canais foram o que se realizaram com a V_c de 40 e 50 m/min, obtendo assim a média de 0,218 μm e 0,225 μm respectivamente no ensaio e 0,348 μm e 0,307 μm nas réplicas.

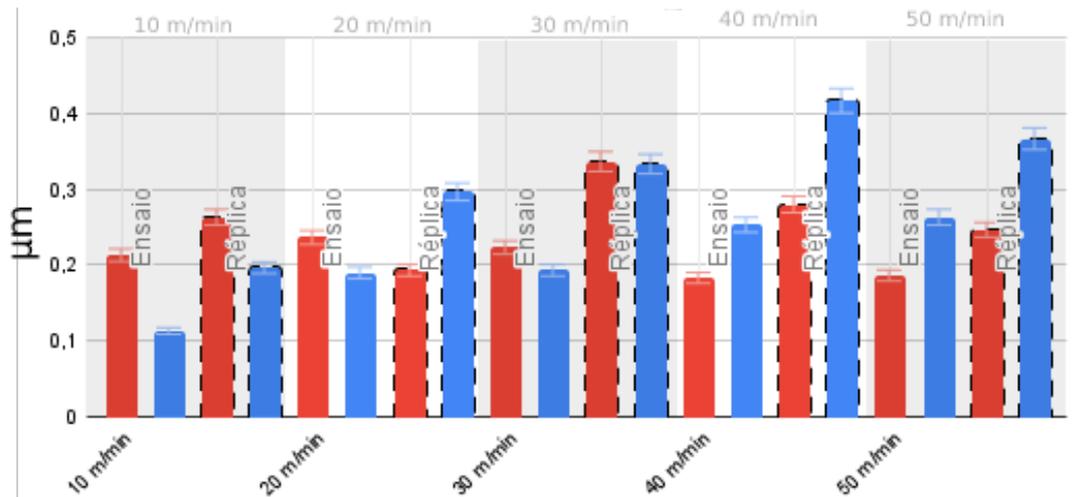


Figura 62 – Comparativa entre os dez canais e o desvio aritmético médio (Ra)

Com o gráfico da figura 63 pode-se observar os valores de Rz, comprovando-se novamente que para o canal que utilizou a V_c de 10 m/min tem o menor valor, com $Rz = 0,96 \mu\text{m}$ e $1,30 \mu\text{m}$ na réplica. Os canais com a V_c entre 40 e 50 m/min tiveram um Rz $1,38 \mu\text{m}$ e $1,43 \mu\text{m}$ junto com a réplica de $1,90 \mu\text{m}$ e $2,02 \mu\text{m}$, sendo assim outra vez os dois canais com pior acabamento superficial.

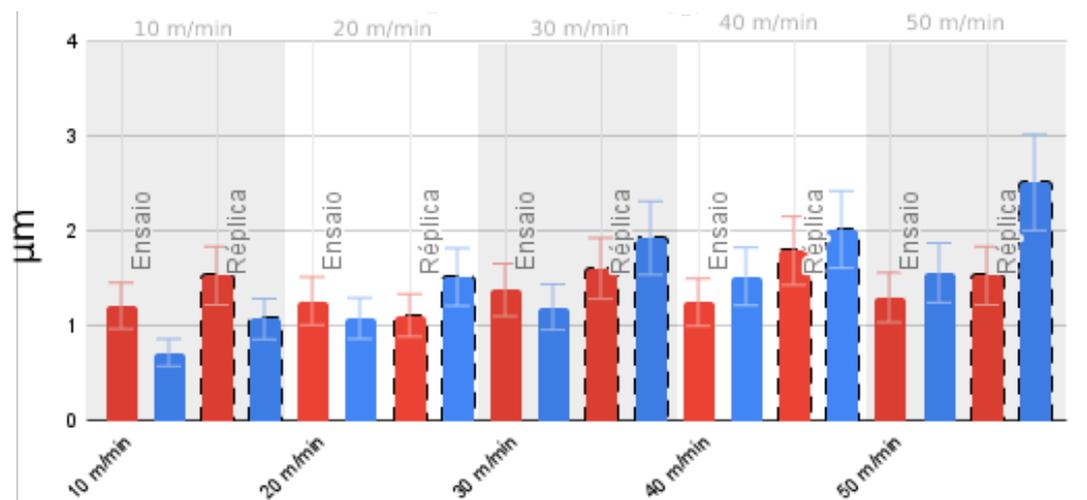


Figura 63 – Comparativa entre os dez canais e a altura média do perfil (Rz)

Com o gráfico da figura 64 pode-se observar como o canal 1 teve o menor valor de Rq com $Rq = 0,20 \mu\text{m}$ e a réplica com $Rq = 0,28 \mu\text{m}$, deixando assim o canal com menor valor médio de Ra, Rq e Rz. De maneira semelhante ao obtido em relação aos outros parâmetros de rugosidade avaliados (Ra e Rz), os canais com a V_c entre 40 e 50 m/min apresentaram os piores resultados, sendo assim o $Rq = 0,28 \mu\text{m}$ e $0,30 \mu\text{m}$ e as réplicas com $Rq = 0,42 \mu\text{m}$ e $0,39 \mu\text{m}$.

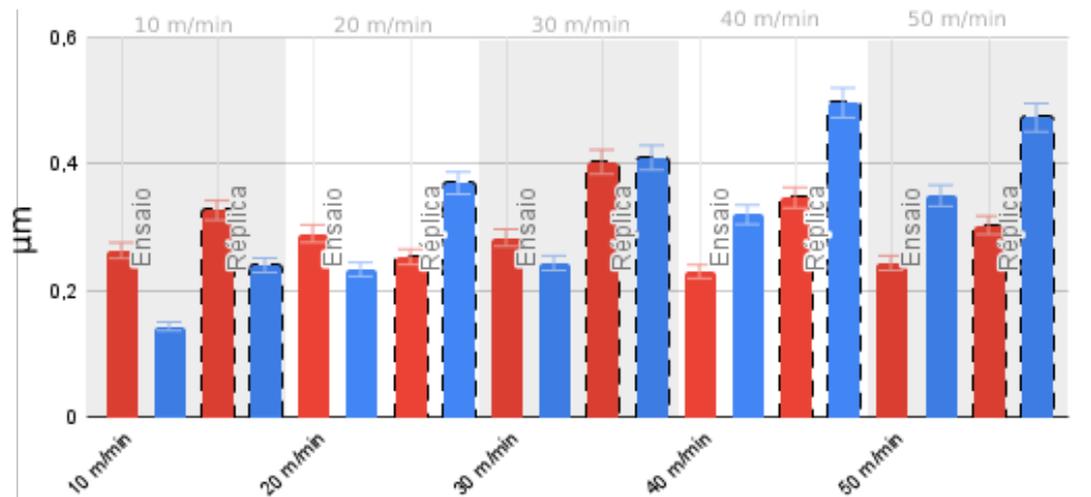


Figura 64 – Comparativa entre os dez canais e desvio médio quadrático (Rq)

Segundo Baptista e Simoes (2000), todos os canais ficaram com um acabamento superficial equivalente ao de um polimento manual, ou seja, com um $Ra < 0,5 \mu\text{m}$. Em comparação com a superfície preparada para usinar que teve um $Ra = 5,8 \mu\text{m}$, pode-se considerar que a usinagem cumpre com o requisito de diminuir a rugosidade e melhorar o acabamento superficial. Na figura 65 pode-se observar como a superfície que foi usinada sem o propósito de obter um bom acabamento superficial possui um acabamento bem irregular, cheio de possíveis defeitos causados por arrancamento de peça, além do valor de Ra elevado.

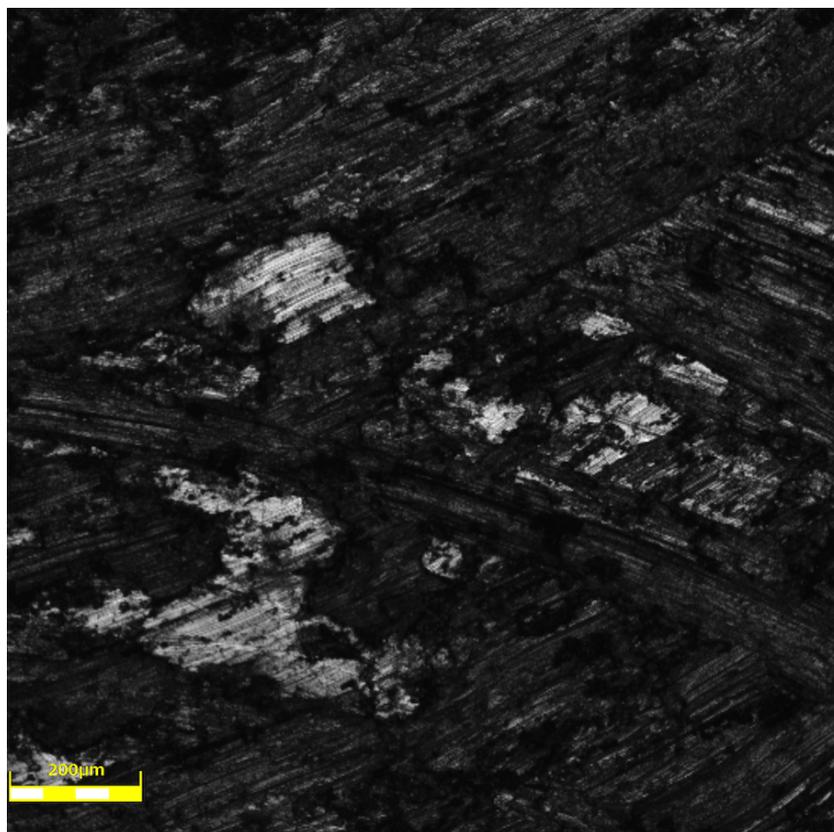


Figura 65 – Superfície de referência

Os canais com a V_c entre 10 e 30 m/min tiveram um acabamento melhor que os obtidos com V_c entre 40 e 50 m/min, mesmo assim, os cinco canais obtiveram um acabamento superficial aceitável pela literatura. Pode-se inferir que uma velocidade de corte inferior possa gerar um acabamento superficial melhor.

Há uma inversão na qualidade do acabamento produzido por movimento concordante e discordante a medida que se aumenta a velocidade de corte. Ou seja, baixas velocidades favorecem melhor acabamento superficial no sentido de corte concordante, enquanto que altas velocidades favorecem melhor acabamento relativo no sentido de corte discordante. O ponto de inflexão é observado em velocidades da ordem de 30 m/min. No canal realizado com a velocidade de corte de 30 m/min os valores de rugosidade para o sentido de corte concordante e discordante foram similares. Seguindo a literatura, o sentido de corte concordante deu um melhor acabamento superficial nos canais com baixa velocidade de avanço, o que era o esperado, já que o movimento gera menos vibrações, porém, para os valores com altas velocidades de avanço, não seguiu essa teoria.

Para obter os valores da dureza nos canais, foram realizadas três medições em cada canal. As medidas foram realizadas no começo, meio e final do canal. Na tabela 15 pode-se observar a média das três medidas junto com o desvio padrão de cada canal. Com esses valores, foi possível gerar o gráfico 66. No gráfico pode-se observar duas colunas por cada velocidade de corte, sendo a primeira coluna o ensaio e a segunda coluna a réplica, na réplica a coluna está representada com linha tracejada. A última coluna é o resultado da média de dureza na amostragem da peça, onde não foi usinado, está representada com a cor cinza.

Tabela 15 – Valores de dureza obtido em cada canal

Dureza (HB)	Média	DP
Canal 1	135,03	6,83
Canal 6	158,70	13,01
Canal 2	145,33	10,87
Canal 7	151,73	16,86
Canal 3	153,93	6,88
Canal 8	167,17	19,69
Canal 4	131,90	14,50
Canal 9	145,07	10,88
Canal 5	158,27	10,42
Canal 10	147,83	4,39
Amostragem	159,07	7,22

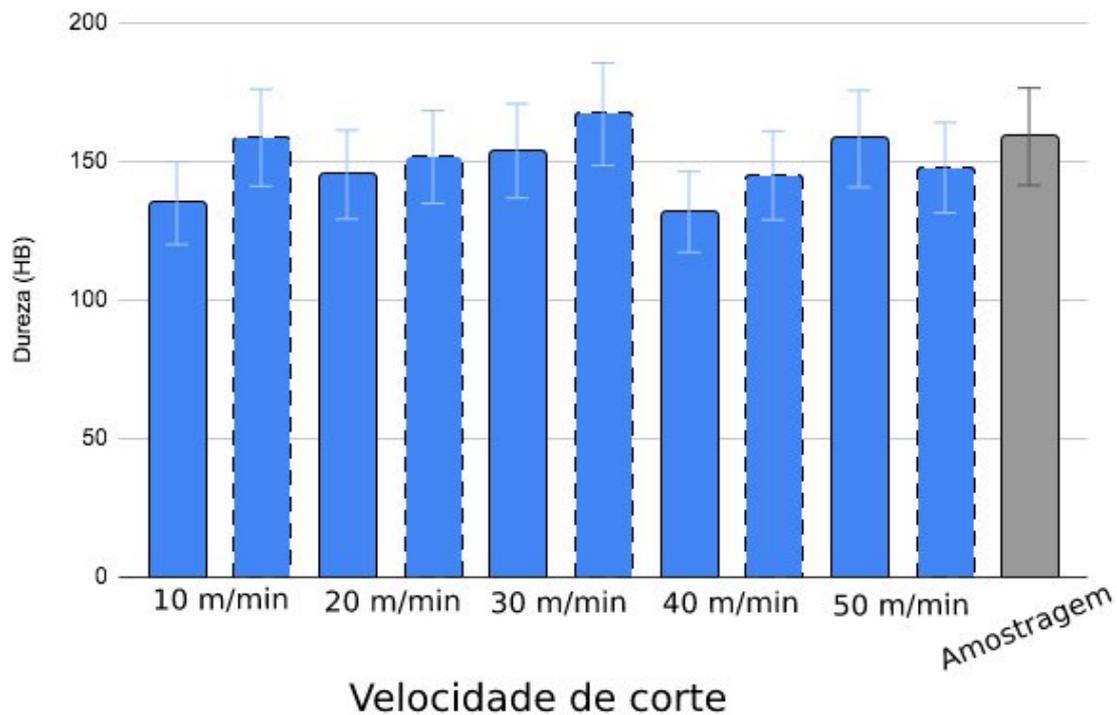


Figura 66 – Comparativa da dureza entre os dez canais

Segundo Callister (2000), o arame ER70S-6 que possui um limite de resistência à tração de 560 MPa deveria ter uma dureza Brinell entre 100 e 200 HB e todos os canais estiveram dentro desse intervalo de dureza. Para o canal 1 ($V_c = 10$ m/min) que foi o canal que teve um menor R_a , a dureza foi de 135,0 HB, já o canal 4 ($V_c = 40$ m/min) teve uma dureza de 131,9 HB. Não se pode afirmar que a dureza da peça foi alterada durante o processo de usinagem devido à heterogeneidade da peça. Para mais detalhes sobre o resultado da dureza na peça, ver apêndice B.

A diferença dos valores da dureza pode ter sido pela diferença na estrutura cristalina que o material possui, neste projeto não se realizou uma análise microestrutural, porém, no estudo realizado por Cervantes et al. (2019), o autor fala sobre a diferença na microestrutura que a peça tem, sendo dividida em três partes, a parte próxima ao substrato, a parte do meio e a parte de cima. Considerando que no começo da peça o autor teve uma microestrutura de finas camadas de perlita, a parte do meio o autor teve uma microestrutura de bainita laminar e na parte superior obteve uma microestrutura de grãos equiaxiais de ferrita e perlita, pode-se observar o motivo pelo qual a peça tem diferente dureza ao longo dela.

O acabamento superficial no canal 4 foi inferior, pode-se observar no gráfico da dureza que a dureza nesse canal é inferior, pode ser uma das causas pela qual o acabamento superficial é inferior. Devido à heterogeneidade da peça, pode ter alguma imperfeição por debaixo de onde foi realizada a usinagem do canal 4, porém, na réplica do canal, a dureza continua baixa em relação aos outros canais.

5 Conclusão

Este estudo teve como objetivo estudar a relação da velocidade de corte no acabamento superficial de peças obtidas pelo processo de MADA. Para isso, dentre as diferentes etapas do trabalho, pode-se mencionar: revisão bibliográfica sobre peças produzidas por MADA, revisão sobre o processo de usinagem, planejamento experimental, realização dos experimentos, medições e análise de resultados. Após realizar estas etapas, foi possível concluir que:

- Os melhores valores de rugosidade foram encontrados aplicando a menor velocidade de corte, concretamente o canal 1 (canal com $V_c = 10$ m/min), que foi o canal que teve menos imperfeições visuais. Esta condição também obteve menores valores de R_a , R_z e R_q médio entre o valor do corte no sentido discordante e concordante.
- O canal 4 (canal com $V_c = 40$ m/min) foi o que apresentou maior quantidade de imperfeições visuais.
- O canal 4 obteve menor valor de R_a (com média de $0,22\mu\text{m}$), R_z (com média de $1,18\mu\text{m}$) e R_q (com média de $0,28\mu\text{m}$) em comparação ao canal 5, porém, pior valor entre os canais 1, 2 e 3. No caso da réplica, os valores do canal 4 foram maiores do que no canal 5.
- A dureza no canal 4 foi inferior em comparação aos outros canais (com média de $131,9$ HB) o qual pode ser um motivo pelo qual o acabamento superficial foi inferior.

5.1 Propostas para trabalhos futuros

Visando ampliar os resultados do presente trabalho, pode-se implementar a outros estudos as seguintes sugestões:

- Realizar um ensaio variando a profundidade de corte ao longo do mesmo canal, para verificar a influência da profundidade de corte.
- Realizar o mesmo ensaio variando as características da fresa, por exemplo, o revestimento e o número de dentes.

- Utilizar $V_c = 10$ m/min (que foi a velocidade que apresentou melhor acabamento superficial no estudo) junto com o avanço por dente de $f_z = 0,020$ mm/dente (obtido por Barreto (2022) como um bom avanço por dente) para ver a diferença no acabamento superficial da peça.
- Realizar o ensaio com canais paralelos à deposição do material, ou seja, no sentido perpendicular ao realizado neste estudo.
- Realizar um ensaio sem utilizar o fluido de corte.
- Realizar um ensaio mediante fresamento tangencial na mesma amostra.

Referências

- 3DEO. *METAL 3D PRINTED SURFACE FINISH*. 2022. "acessado em 23/04/2022". Disponível em: <<https://www.3deo.co/surface-finish-guide/>>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 27 e 28.
- 3DPRINTING. *LASIMM – A Hybrid Manufacturing and Metrology Solution*. 2021. "acessado em 24/04/2022". Disponível em: <<https://3dprinting.com/metal/lasimm-a-hybrid-manufacturing-and-metrology-solution/>>. Citado 4 vezes nas páginas vi, vii, 5 e 29.
- ABNT. *ABNT NBR ISO 4287: 2002. Especificações geométricas do produto (GPS)-Rugosidade: método do perfil–Termos, definições e parâmetros de rugosidade*. [S.l.]: ABNT, 2002. Citado na página 42.
- ADEBAYO, A. Characterisation of integrated waam and machining processes. Cranfield University, 2013. Citado 3 vezes nas páginas vii, 31 e 32.
- AGGEN FRANK W. AKSTENS, C. M. A. G. et al. *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. Brasil: ASM International, 1990. Citado 2 vezes nas páginas vii e 25.
- BAPTISTA, R.; SIMOES, J. A. Three and five axes milling of sculptured surfaces. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 103, n. 3, p. 398–403, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 53 e 57.
- BARRETO, T. de S. M. Estudo das características de usinagem de peças metálicas obtidas por manufatura aditiva a arco. UNIVERSIDADE Brasília, 2022. Citado 6 vezes nas páginas vii, 20, 36, 42, 53 e 61.
- BIOLUB, Q. L. *ÓLEO SOLÚVEL SINTÉTICO BIODEGRADÁVEL PARA CORTE DE METAIS*. 2017. "acessado em 08/08/2022". Disponível em: <<https://biolub.com.br/oleos-soluveis-sinteticos/bio-100e>>. Citado na página 40.
- BLÖDORN, R. et al. Estudo do furo e do processo de furação empregado no método do furo cego para medição de tensões residuais. 2014. Citado 2 vezes nas páginas vii e 17.
- BOHLER. *BOHLER SG 2, Solid Wire, mild steel*. 2022. "acessado em 28/09/2022". Disponível em: <http://www.vabw-service.com/documents/boehler/datenblaetter/en/L1_16699_en__BOEHLER_SG_2_3U10B20G_3291525__EN.pdf?cache=1648417168>. Citado 2 vezes nas páginas ix e 35.
- BOURELL, D.; KRUTH, J. P.; LEU, M.; LEVY, G.; ROSEN, D.; BEESE, A. M.; CLARE, A. Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*, Elsevier, v. 66, n. 2, p. 659–681, 2017. Citado na página 11.

BRITO, T. G. d. Otimização do fresamento de topo do aço abnt 1045 utilizando projeto de parâmetro robusto. 2012. Citado na página 20.

CALLISTER, J. W. D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Brasil: LTC, 2000. Citado 5 vezes nas páginas 24, 25, 26, 43 e 59.

CERVANTES, J. J.; BALDERAS, A.; SÁNCHEZ, A.; RODRÍGUEZ, J.; ESPINOZA, J. L.; BARBA, A.; RUIZ, L. “determinación de parámetros óptimos para un proceso de manufactura aditiva de acero er70s-6, aplicado mediante proceso mig-router cnc”. 2019. Citado 5 vezes nas páginas vi, 3, 4, 12 e 59.

CHERNOVOL, N.; SHARMA, A.; TJAHJOWIDODO, T.; LAUWERS, B.; RYMENANT, P. V. Machinability of wire and arc additive manufactured components. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Elsevier, v. 35, p. 379–389, 2021. Citado na página 13.

CHIFFRE, L. D.; LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; LUCCA, D.; GOCH, G.; BROWN, C.; RAJA, J.; HANSEN, H. N. Quantitative characterisation of surface texture. *CIRP Annals*, Elsevier, v. 49, n. 2, p. 635–652, 2000. Citado na página 42.

DEBROY, T.; WEI, H.; ZUBACK, J.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J.; MILEWSKI, J.; BEESE, A. M.; WILSON-HEID, A. d.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, Elsevier, v. 92, p. 112–224, 2018. Citado na página 11.

DING, D.; PAN, Z.; DUIN, S. V.; LI, H.; SHEN, C. Fabricating superior nial bronze components through wire arc additive manufacturing. *Materials*, MDPI, v. 9, n. 8, p. 652, 2016. Citado na página 8.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. Artliber Editora São Paulo (in Portuguese), 2003. Citado na página 22.

DTTMANN, A.; GOMES, J. de O. Evaluation of additive manufacturing parts machinability using automated gmaw er70s-6 with nodular cast iron. *U. Porto Journal of Engineering*, v. 7, n. 2, p. 88–97, 2021. Citado 4 vezes nas páginas vii, 29, 30 e 31.

DVORAK, J.; CORNELIUS, A.; CORSON, G.; ZAMEROSKI, R.; JACOBS, L.; PENNEY, J.; SCHMITZ, T. Machining considerations for waam preforms. 2021. Citado 3 vezes nas páginas vii, 26 e 27.

ELECTRIC, S. *A Comprehensive Range of Modular Single- and Multi-Axis Systems for All Linear Movements*. 2009. "acessado em 20/06/2022". Disponível em: <https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Brochure&p_File_Name=DIA7ED1090605EN.pdf&p_Doc_Ref=DIA7ED1090605EN>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 35.

FERNANDES, M. O. *PROJETO DE INSTALAÇÃO DE UM ROBÔ CARTESIANO DE 3 GRAUS DE LIBERDADE*. Brasília, Brasil: Universidade de Brasília, 2016. Citado na página 35.

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. [S.l.]: Editora blucher, 2018. Citado 2 vezes nas páginas vii e 18.

FERRARESI, D.; PALLEROSI, C. A.; RUFFINO, R. T. et al. Fresamento. EESC/USP, 1970. Citado na página 14.

- FRANHO. *FM-500 / FM-500H / FM-500HM*. 2022. "acessado em 29/03/2022". Disponível em: <<https://www.franho.com.br/fm-500>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 38.
- FRONIUS. *Manual de instruções TransPuls Synergic 3200/4000/5000*. 2022. "acessado em 17/03/2022". Disponível em: <[https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%\\$2C0001%2CPB.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%$2C0001%2CPB.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 36.
- FUCHS, C.; BAIER, D.; SEMM, T.; ZAEH, M. F. Determining the machining allowance for waam parts. *Production Engineering*, Springer, v. 14, n. 5, p. 629–637, 2020. Citado na página 5.
- GIBSON, I. G. I. *Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. [S.l.]: Springer, 2015. Citado na página 7.
- GROOVER, M. P. *Introdução aos processos de fabricação*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. Citado 2 vezes nas páginas vi e 15.
- HACKENHAAR, W. Estudo das propriedades mecânicas e do resfriamento em manufatura aditiva por deposição a arco. 2021. Citado na página 2.
- HAUSER, T.; REISCH, R. T.; BREESE, P. P.; NALAM, Y.; JOSHI, K. S.; BELA, K.; KAMPS, T.; VOLPP, J.; KAPLAN, A. F. Oxidation in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 41, p. 101958, 2021. Citado na página 12.
- HIOKI, D. *Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- IMOUDU, N. E.; AYELE, Y.; BARABADI, A. The characteristic of cold metal transfer (cmt) and its application for cladding. In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. [S.l.], 2017. p. 1883–1887. Citado 3 vezes nas páginas ix, 9 e 10.
- ISO, E. *Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections*. [S.l.]: UNE-EN ISO 5817, 2003. Citado na página 51.
- ISO, U. *Clasificación imperfecciones geométricas en soldaduras*. [S.l.]: UNE-EN ISO 6520-1, 1998. Citado na página 51.
- KARYAPPA, R.; HASHIMOTO, M. Chocolate-based ink three-dimensional printing (ci3dp). *Scientific reports*, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2019. Citado 2 vezes nas páginas vi e 2.
- KRATOCHVIL, R. et al. Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial. Florianópolis, SC, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- LASIMM. *LASIMM Presentation*. 2017. "acessado em 24/04/2022". Disponível em: <https://www.lasimm.eu/documents/LASIMM_presentation.pdf>. Citado na página 28.

- LEWANDOWSKI, J. J.; SEIFI, M. Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties (postprint). Case Western Reserve University Cleveland United States, 2016. Citado na página 10.
- LOPES, J.; MACHADO, C. M.; DUARTE, V. R.; RODRIGUES, T. A.; SANTOS, T. G.; OLIVEIRA, J. Effect of milling parameters on hsla steel parts produced by wire and arc additive manufacturing (waam). *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 59, p. 739–749, 2020. Citado 2 vezes nas páginas vii e 19.
- MACEDO, S. E. M. Análise de forças no fresamento de topo convencional e com altas velocidades de corte. Florianópolis, SC, 2001. Citado 5 vezes nas páginas vii, 14, 15, 16 e 17.
- MACHADO, Á. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. da. *Teoria da usinagem dos materiais*. [S.l.]: Editora Blucher, 2009. Citado 4 vezes nas páginas vii, 22, 23 e 24.
- MARTINS, R. M. E. *Ferramenta Computacional para Auxílio na Tomada de Decisão no Processo de Fresagem*. Tese (Doutorado) — Instituto Politecnico de Braganca (Portugal), 2019. Citado na página 22.
- MASKERY, I.; ABOULKHAIR, N.; CORFIELD, M.; TUCK, C.; CLARE, A.; LEACH, R. K.; WILDMAN, R. D.; ASHCROFT, I.; HAGUE, R. J. Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted al–si10–mg using x-ray computed tomography. *Materials Characterization*, Elsevier, v. 111, p. 193–204, 2016. Citado na página 11.
- MCANDREW, A. R.; ROSALES, M. A.; COLEGROVE, P. A.; HÖNNIGE, J. R.; HO, A.; FAYOLLE, R.; EYITAYO, K.; STAN, I.; SUKRONGPANG, P.; CROCHEMORE, A. et al. Interpass rolling of ti-6al-4v wire+ arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 21, p. 340–349, 2018. Citado 2 vezes nas páginas vi e 9.
- MITSUBISHI. *TERMINOLOGIA DAS FRESAS DE TOPO*. 2022. "acessado em 17/03/2022". Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/3514/8169/2983/tec_solid_end_mills_terminology_pt-br.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 21.
- MONTEVECCHI, F.; GROSSI, N.; TAKAGI, H.; SCIPPA, A.; SASAHARA, H.; CAMPATELLI, G. Cutting forces analysis in additive manufactured aisi h13 alloy. *Procedia Cirp*, Elsevier, v. 46, p. 476–479, 2016. Citado na página 25.
- MX3D. *Butterfly Screen*. 2022. "acessado em 09/04/2022". Disponível em: <<https://mx3d.com/industries/art/butterfly-screen/>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 2.
- MX3D. *Oregon Dragon Bench*. 2022. "acessado em 09/04/2022". Disponível em: <<https://mx3d.com/industries/art/oregon-dragon-bench/>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 3.
- MX3D. *WAAM for Oil Gas*. 2022. "acessado em 09/04/2022". Disponível em: <<https://mx3d.com/industries/oil-gas/>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 3.
- NEMANI, A. V.; GHAFARI, M.; NASIRI, A. On the post-printing heat treatment of a wire arc additively manufactured er70s part. *Materials*, MDPI, v. 13, n. 12, p. 2795, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 54.

- NEWMAN, S. T.; ZHU, Z.; DHOKIA, V.; SHOKRANI, A. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP annals*, Elsevier, v. 64, n. 1, p. 467–470, 2015. Citado na página 5.
- NOVELINO, A. L. B. Estudo da geometria dos cordões fabricados pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco. UNIVERSIDADE Brasília, 2021. Citado 6 vezes nas páginas vii, ix, 12, 34, 35 e 36.
- OLYMPUS. *OLS4100 LEXT*. 2022. "acessado em 05/04/2022". Disponível em: <http://www.techsansystem.co.kr/image/4100/OLS4100_.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 41.
- PEREIRA, T.; KENNEDY, J. V.; POTGIETER, J. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 30, p. 11–18, 2019. Citado na página 8.
- PIMENTA, R. S. Avaliação da resistência a fadiga em peças impressas através de manufatura aditiva por deposição a arco. UNIVERSIDADE Brasília, 2022. Citado 2 vezes nas páginas viii e 39.
- POLLI, M. L. et al. Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte. Florianópolis, SC, 2005. Citado na página 18.
- PRADO-CERQUEIRA, J. L.; CAMACHO, A. M.; DIÉGUEZ, J. L.; RODRÍGUEZ-PRIETO, Á.; ARAGÓN, A. M.; LORENZO-MARTÍN, C.; YANGUAS-GIL, Á. Analysis of favorable process conditions for the manufacturing of thin-wall pieces of mild steel obtained by wire and arc additive manufacturing (waam). *Materials*, MDPI, v. 11, n. 8, p. 1449, 2018. Citado na página 32.
- REJESKI, D.; ZHAO, F.; HUANG, Y. Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 19, p. 21–28, 2018. Citado na página 1.
- RIGATTI, A. M. Y. Avaliação da força de usinagem e energia específica de corte no fresamento com alta velocidade de corte. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2010. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- RON, T.; LEVY, G. K.; DOLEV, O.; LEON, A.; SHIRIZLY, A.; AGHION, E. The effect of microstructural imperfections on corrosion fatigue of additively manufactured er70s-6 alloy produced by wire arc deposition. *Metals*, MDPI, v. 10, n. 1, p. 98, 2020. Citado na página 51.
- ROSA, F. G. d. Manufatura aditiva por deposição a arco: uma análise crítica da tecnologia e perspectivas para o futuro. 2020. Citado na página 3.
- SABERI, S.; YUSU, R. M.; ZULKIFLI, N.; AHMA, M. M. Effective factors on advanced manufacturing technology implementation performance: a review. *Journal of Applied Sciences*, v. 10, n. 13, p. 1229–1242, 2010. Citado na página 1.
- SANDVIK. *Fresamento concordante vs. fresamento discordante*. 2022. "acessado em 01/04/2022". Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 14 e 15.

- SANDIVIK. *Fórmulas e definições de fresamento*. 2022. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 20 e 21.
- SILVA, E. L. d. Modelagem da força de usinagem no fresamento de faceamento de alto avanço do aço abnt 1045. 2014. Citado na página 14.
- SIMÃO, N. P. Avaliação da usinabilidade do aço sae 1020 em uma ferramenteira com diferentes fresas. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, 2018. Citado na página 20.
- SOLA, A.; NOURI, A. Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, Wiley Online Library, v. 1, n. 3, p. e10021, 2019. Citado 2 vezes nas páginas vi e 11.
- STIPKOVIC, M. A. Análise da integridade superficial no fresamento de acabamento do aço aisi 4140 endurecido. Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2012. Citado na página 22.
- TIAN, H.; LU, Z.; LI, F.; CHEN, S. Predictive modeling of surface roughness based on response surface methodology after waam. In: ATLANTIS PRESS. *2019 International Conference on Electronical, Mechanical and Materials Engineering (ICE2ME 2019)*. [S.l.], 2019. p. 47–50. Citado na página 33.
- VACARO, T. Otimização do fresamento de topo esférico de planos inclinados aplicando o método de algoritmos genéticos. 2014. Citado 3 vezes nas páginas vii, 22 e 23.
- VAFADAR, A.; GUZZOMI, F.; RASSAU, A.; HAYWARD, K. Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*, MDPI, v. 11, n. 3, p. 1213, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- VALLE, P. D. et al. Avaliação da influência da minimização e eliminação do fluido de corte no processo de pensamento de topo reto. Florianópolis, SC, 2001. Citado 6 vezes nas páginas vi, 13, 14, 18, 19 e 21.
- VEIGA, F.; VAL, A. G. D.; SUÁREZ, A.; ALONSO, U. Analysis of the machining process of titanium ti6al-4v parts manufactured by wire arc additive manufacturing (waam). *Materials*, MDPI, v. 13, n. 3, p. 766, 2020. Citado na página 33.
- VIMAL, K.; SRINIVAS, M. N.; RAJAK, S. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: a review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 41, p. 1139–1145, 2021. Citado 2 vezes nas páginas vi e 8.
- VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2017. Citado na página 7.
- VONDER. *Fresa de topo em aço rápido 5,0 mm, com 4 cortes, DIN 844A, VONDER53.15.050.000*. 2022. "acessado em 09/04/2022". Disponível em: <https://www.vonder.com.br/produto/fresa_de_topo_em_aco_rapido_50_mm_com_4_cortes_din_844a_vonder/7365>. Citado 2 vezes nas páginas ix e 37.
- WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, Hindawi, v. 2012, 2012. Citado na página 1.

WU, B.; PAN, Z.; DING, D.; CUIURI, D.; LI, H.; XU, J.; NORRISH, J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 35, p. 127–139, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 9, 11 e 12.

ZHANG, S.; ZHANG, Y.; GAO, M.; WANG, F.; LI, Q.; ZENG, X. Effects of milling thickness on wire deposition accuracy of hybrid additive/subtractive manufacturing. *Science and technology of welding and joining*, Taylor & Francis, v. 24, n. 5, p. 375–381, 2019. Citado 3 vezes nas páginas vi, 12 e 32.

ZWICK/ROELL. *ZHU250 - Universal Hardness Tester up to 250 kg*. 2022. "acessado em 05/04/2022". Disponível em: <https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/15_489_ZHU250_Universal_Hardness_Tester_up_to_250_kg_PI_EN.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 43.

Apêndices

A Resultado da medição da rugosidade

		Ra	Rz	Rq
canal 1	discordante	0,22	1,31	0,27
		0,26	1,24	0,31
		0,16	1,08	0,21
	concordante	0,12	0,82	0,16
		0,12	0,75	0,15
		0,1	0,58	0,12
canal 2	discordante	0,29	1,44	0,35
		0,2	1,18	0,25
		0,22	1,16	0,27
	concordante	0,2	1,02	0,24
		0,19	1,17	0,23
		0,18	1,04	0,23
canal 3	discordante	0,25	1,32	0,3
		0,17	1,04	0,22
		0,25	1,77	0,33
	concordante	0,21	1,3	0,27
		0,17	1,05	0,21
		0,2	1,24	0,25
canal 4	discordante	0,19	1,17	0,23
		0,18	1,22	0,22
		0,18	1,35	0,24
	concordante	0,26	1,43	0,32
		0,24	1,62	0,32
		0,26	1,51	0,32
canal 5	discordante	0,2	1,41	0,27
		0,18	1,26	0,23
		0,18	1,22	0,23
	concordante	0,31	1,76	0,41
		0,21	1,36	0,28
		0,27	1,55	0,36
Superfície de referência		5,85	33,48	7,3
		5,9	32,94	7,16
		5,65	30,88	6,89

Figura 67 – Resultado da medição da rugosidade nos ensaios

		Ra	Rz	Rq
canal 6	discordante	0,22	1,6	0,27
		0,38	1,68	0,46
		0,19	1,3	0,25
	concordante	0,21	0,99	0,25
		0,21	1,33	0,26
		0,17	0,89	0,21
canal 7	discordante	0,15	0,88	0,18
		0,14	0,77	0,18
		0,29	1,68	0,4
	concordante	0,25	1,22	0,3
		0,32	1,76	0,42
		0,32	1,56	0,39
canal 8	discordante	0,26	1,63	0,33
		0,44	1,64	0,5
		0,31	1,54	0,38
	concordante	0,39	2,28	0,49
		0,27	1,35	0,32
		0,34	2,14	0,42
canal 9	discordante	0,35	1,92	0,42
		0,27	1,71	0,33
		0,22	1,74	0,29
	concordante	0,4	2	0,47
		0,42	2,12	0,51
		0,43	1,92	0,51
canal 10	discordante	0,25	1,64	0,31
		0,24	1,53	0,3
		0,25	1,41	0,3
	concordante	0,37	2,13	0,45
		0,34	3,04	0,46
		0,39	2,36	0,51

Figura 68 – Resultado da medição da rugosidade nas réplicas

B Resultado da medição da dureza

Dureza (HB)	fim	meio	começo	média
Canal 1	127,2	138,2	139,7	135,0
Canal 2	149,5	133,0	153,5	145,3
Canal 3	146,1	156,7	159	153,9
Canal 4	148,5	125,5	121,7	131,9
Canal 5	146,4	162,5	165,9	158,3
Canal 6	166,9	165,5	143,7	158,7
Canal 7	170,8	145,6	138,8	151,7
Canal 8	155,8	155,8	189,9	167,2
Canal 9	151,2	132,5	151,5	145,1
Canal 10	145,5	152,9	145,1	147,8
Amostragem	160,6	165,4	151,2	159,1

Anexos

A Especificações do arame ER70S-6



BÖHLER SG 2

Solid Wire, mild steel

Classifications	
EN ISO 14341-A	AWS A5.18 / SFA-5.18
G 42 3 M21 3Si1	ER70S-6
G 38 3 C1 3Si1	

Characteristics and typical fields of application
 GMAW solid wire for welding unalloyed and low alloy steels. Low spatter in short and spray arc transfer modes with CO₂ or gas mixture. The wire is used in boiler, pipeline and structural constructions, shipbuilding and vehicle manufacturing.

Base materials
 Steels with yield strength < 420 MPa (60 ksi)
 S235JR-S355JR, S235J0-S355J0, S235J2-S355J2, S275N-S420N, S275M-S420M, P235GH-P355GH, P275NL1-P355NL1, P215NL, P265NL, P355N, P285NH-P420NH, P195TR1-P265TR1, P195TR2-P265TR2, P195GH-P265GH, L245NB-L415NB, L245MB-L415MB, GE200-GE240, ship building steels: A, B, D, E, A 32-E 36
 ASTM A 106 Gr. A, B, C; A 181 Gr. 60, 70; A 283 Gr. A, C; A 285 Gr. A, B, C; A 350 Gr. LF1; A 414 Gr. A, B, C, D, E, F, G; A 501 Gr. B; A 513 Gr. 1018; A 516 Gr. 55, 60, 65, 70; A 573 Gr. 58, 65, 70; A 588 Gr. A, B; A 633 Gr. C; A 662 Gr. B; A 711 Gr. 1013; A 841 Gr. A; API 5 L Gr. B, X42, X52, X56, X60

Typical analysis			
	C	Si	Mn
wt.-%	0.07	0.85	1.5

Mechanical properties of all-weld metal - typical values (min. values)				
Condition	Yield strength R _y	Tensile strength R _m	Elongation A (L ₀ =5d ₀)	Impact energy ISO-V KV J
	MPa	MPa	%	-30°C
u	450 (≥ 420)	575 (≥ 500 - 640)	30 (≥ 20)	≥ 27
u2	430 (≥ 420)	555 (≥ 500 - 640)	29 (≥ 20)	≥ 27
u untreated, as welded – shielding gas Ar + 15 – 25% CO ₂				
u2 untreated, as welded – shielding gas 100% CO ₂				

Operating data			
	Polarity	DC+	Dimension mm
	Shielding gas (EN ISO 14175)	M21	0.8
		C1	0.9
			1.0
			1.2
			1.6

Approvals
 TÜV (13009), DB (42.236.01), ABS, CWB, CE

B Especificações da fresa

9/6/22, 14:17

Fresa de topo em aço rápido 5,0 mm , com 4 cortes , DIN 844A , ...



Produtos e Acessórios
Ferramentas de corte, furação, rosqueamento,
fresamento e acessórios para máquinas
operatrizes
Fresamento
Fresa topo reta aço rápido múltiplos cortes
milímetro

53.15.050.000 Fresa de topo em aço rápido 5,0 mm, com 4 cortes, DIN 844A, VONDER.

Marca

VONDER

Destaque e diferenciais

Indicada para abrir canais, rasgos de chaveta,
desbaste e acabamento em peças de aço.

Aplicações/Dicas de uso

Indicada para abrir canais, rasgos de chaveta,
desbaste e acabamento em peças de aço.



Características

Diâmetro: 5,0 mm
Medida da haste: 6,0 mm
Comprimento útil: 15,0 mm
Comprimento total: 56,0 mm
Nº de cortes: 4
Sentido de corte: Direita
Material: Aço rápido
Tipo de haste: Cilíndrica
Cobertura: Sem Cobertura
Segue norma(s): DIN 844

Conteúdo

1 Fresa de topo.

C Especificações da Fresadora CNC Vega XH7132

SPECIFICATION

Model	XH7132
Table size	920x320 mm
Table travel (X, Y, Z)	620x350x500 mm
T-slot(number-width-distance)	3/14/85 mm
Distance from spindle end to table top	100-600 mm
Distance from spindle center to column guide way	395 mm
Spindle taper	BT40
Spindle speed range	60-6000 r/min
Rapid feed speed (X,Y,Z)	18000 mm/min
Feed Speed (X, Y, Z)	2.5 – 3000 mm/min
Tool magazine Capability	16 qty
Max. dimension of tool	Ø 120 x 200 mm
Max. weight of tool	8 kg.
Positioning accuracy	± 0.015
Repeat Positioning accuracy	± 0.0075
Main motor (spindle)	3.7kw
Feed motor	1.2kw
Cooling pump	0.1KW
CNC System	Fanuc Oi Mate – MD
Overall dimension (LxWxH)	2050 × 1870 × 2170 mm
Machine Weight	2540 kg.

STANDARD ACCESSORIES:

- Fanuc Oi Mate-MD
- Spanner
- Wrench
- Adjusting Screw
- Sizing block

OPTIONAL ACCESSORIES

- Siemens 02C or KND 1000I CNC system
- Assemble A axis

D Especificações da serra fita

Franho FM 500



FM 500
 AVANÇO HIDRÁULICO
H / HM
 RETORNO HIDRÁULICO
 MORSA HIDRÁULICA

CAPACIDADE DE CORTE		
α°	mm	
0°	250	205 x 315
±45°	200	200 x 200

Potência do Motor	cv	1,5
Velocidade de Corte	m/min	30 - 55 - 80
Dimensões da Fita	mm	3880 x 27 x 0,9
Dimensões da Maq.	mm (C x L x A)	2200 x 540 x 1500
Peso Aproximado	kg	450/ 480/ 495

- Descida do cabeçote com controle hidráulico
- Parada automática no fim do corte
- Guias da fita duráveis confeccionadas em metal duro
- Indicador de tensão correta da fita e escova limpa fita
- Fixação rápida do material por morsa com cremalheira
- Sistema de refrigeração com bomba recirculante



Retorno
 Hidráulico
FM 500H



Morsa
 Hidráulica
FM 500HM

E Código do programa

N10 G17 G21 G90 G94;

N20 Z5 X0 Y0;

N30 G54 S4000 M3;

N40 G51 F800;

N50 Z-0.5;

N60 X25;

N70 Y60;

N80 Z5;

N90 X35 Y0;

N100 G54 S4500;

N110 G51 F900;

N120 Z-0.5;

N130 Y60;

N140 Z5;

N150 X45 Y0;

N160 G54 S5000;

N170 G51 F1000;

N180 Z-0.5;

N190 Y60;

N200 Z5;

N210 X55 Y0;

N220 G54 S5500;

N230 G51 F1100;

N240 Z-2;

N250 Y60;

N260 Z5;

N270 X65 Y0;

N280 G54 S6000;

N290 G51 F1200;

N300 Z-0.5;

N310 Y60;

N320 Z10;

N330 X0 Y0;

N340 M30

F Especificações do durômetro Zwick Roell ZHU 250



Product Information

ZHU250 - Universal Hardness Tester up to 250 kg

Technical data

Basic device

Item no.	024484	
Test load, min.	1	kg
Test load, max.	250	kg
Included in the scope of delivery	Holding down clamp	
Optical indentation measuring device	Focusing screen	
Test method	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: HV1, HV2, HV3, HV5, HV10, HV20, HV30, HV50, HV60, HV100, HVT • Knoop: HK1 • Brinell: HBW 1/1 ... 1/30 - HBW 2.5/6,25 ... 2.5/187.5 - HBW 5/25 ... 5/250 - HBW 10/100 ... 10/250 and HBT • Rockwell: HR scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, 15N, 30N, 45N, 15T, 30T, 45T • Ball indentation hardness: H - 49.03 N / 132.39 N / 357.9 N / 961.0 N 	
Voltage	Adjustable, 100 ... 250	V
Dimensions:		
Height, approx.	1200	mm
Width, approx.	270	mm
Depth, approx.	870	mm
Weight, approx.	300	kg

Lenses

Description	Item number
Lens for 15x magnification, field of view diameter approx. 10.0 mm	369404
Lens for 45x magnification, field of view diameter approx. 3.3 mm	369405
Lens for 90x magnification, field of view diameter approx. 1.7 mm	369406
Lens for 185x magnification, field of view diameter approx. 0.8 mm	369407
Lens for 360x magnification, field of view diameter approx. 0.42 mm	1037407
Lens for 520x magnification, field of view diameter approx. 0.29 mm	369409

Rockwell hardness tests

Type	Indenter as per hardness test method	Included in delivery	Item No.
Indenter	Rockwell, with hard metal ball, 1/16" (1.587 mm)	Official test certificate	320859
Indenter	Rockwell, with hard metal ball, 1/8" (3.175 mm)	Official test certificate	320861
Indenter	Rockwell, with hard metal ball, 1/4" (6.35 mm)	Official test certificate	368896
Indenter	Rockwell, with hard metal ball, 1/2" (12.7 mm)	Official test certificate	368897
Indenter	Rockwell, with diamond tip 120°, Ø 0.2 mm	Official test certificate	368899

Brinell hardness test

Type	Indenter as per hardness test method	Included in delivery	Item No.
Indenter, one-piece	Brinell, with hard metal ball, 10 mm	Official test certificate	368898
Indenter, one piece	Brinell, with hard metal ball 5 mm		320894

All data at ambient temperature.

We reserve the right to make technical changes in the course of ongoing development.

G Especificações do fluido de corte

BIO100E



BIO 100 E

ÓLEO SOLÚVEL SINTÉTICO BIODEGRADÁVEL PARA CORTE DE METAIS

APRESENTAÇÃO: Óleo solúvel sintético para usinagem. Em solução aquosa continua transparente esverdeado. Possui excepcional durabilidade, excelente poder lubrificante, refrigerante e anticorrosivo. Não provoca manchas em metais amarelo, alumínio e aço inox. Não causa dermatites quando usado adequadamente. Produto biodegradável, facilitando assim sua manipulação, diminuindo os riscos de uso e descarte.

APLICAÇÃO: Na maioria das operações de usinagens de metais ferrosos e não ferrosos, tais como: rosquear, mandrilhar, afiar, aplainar, brunir, escarear, serrar, furar, etc. Utilizado em máquinas operatrizes, inclusive retíficas e CNC.

CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS

-Produto Sintético: Oferece maior segurança a saúde e meio ambiente, por ser isento de Nitrito, fenóis, óleo minerais, metais pesados, cloro, enxofre, amins secundárias, etc. Atende norma NR 15;

-Excelente resistência à ação microbiana e poder anticorrosivo

-Baixa formação de espuma

MODO DE USAR: Deve-se esgotar e limpar o tanque reservatório do sistema. Higienizar com PRESERV X 49, para em seguida diluir o BIO 100 E em água, numa proporção de 1:20 ou 5% (1 litro de óleo para 19 litros de água). Em usinagens mais severas, dilua na proporção de 1:10 ou 10% (1 litro de óleo para 9 litros de água).

TABELA DE CONCENTRAÇÃO

Concentração	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%
Leitura refratômetro	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5

CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS:

Aspecto-visual	Amarelo Esverdeado
Densidade _{20/4 C} -NBR 7148	1,065g/cm ³
Fator de Refração-MT 29	3,33
PH (3% em Água)-MT 6	9,5
Corrosão ferro fundido GG 25,sol. 3%-DIN 51.3560/2	Sem corrosão

EMBALAGENS: 1 litro, 5 litros, 20 litros, 50 litros e 200 litros.

PRECAUÇÕES: Trabalhar com EPI's. Não ingerir. Evitar contato prolongado com a pele. Em contato com os olhos, lave com água em abundância por no mínimo 15 minutos. Mantenha fora do alcance de crianças e animais. Para maiores informações de segurança, solicite a FISPQ do produto.

VALIDADE: Acondicionado em lugar fresco e seco - 24 meses.

BIO 100 E

Revisão 07
Data: 13/07/2017

