



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

**Avaliação da qualidade superficial no
fresamento de peças de ER70S-6 obtidas por
MADA em função da velocidade de corte e da
direção de deposição**

Por

Eduardo Neves Mota

Brasília-DF, dezembro 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

Avaliação da qualidade superficial no fresamento de peças de ER70S-6 obtidas por MADA em função da velocidade de corte e da direção de deposição

POR,

Eduardo Neves Mota

Projeto de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Profa. Dra. Déborah De Oliveira, ENM/FT-UnB (Orientadora)

Prof. Dr. Maksym Ziberov, ENM/FT-UnB

Prof. Dr. Raphael Lima de Paiva, UFPI

Brasília-DF, dezembro de 2023

Dedicatória

*Este trabalho é dedicado às minhas tias,
Monica, Jacinta e ao meu tio Zo que suas
almas descansem em Jesus.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Jesus, o único Deus de quem vêm todas as coisas e para quem eu vivo. Nele está a minha vida e toda a minha sustentação, aquele que me guia e me protege. Agradeço pelo seu maravilhoso espírito ter me conduzido até esta etapa, dando-me inteligência e força para que eu pudesse completar todos os meus desafios.

Agradeço também à minha família, principalmente aos meus pais Edvaldo e Ivone, que sempre me apoiaram em todos os meus caminhos. Agradeço por eles me cercarem de amor e por fazerem de mim o filho mais feliz deste mundo, por tê-los na minha vida.

Quero agradecer à minha professora e orientadora Déborah de Oliveira, por todo o seu carinho e dedicação em me ajudar nesta jornada, sempre com paciência e didática em todos os seus conselhos. Este trabalho não existiria se não fosse pela senhora.

Sou grato à Universidade de Brasília (UnB) e a todo o departamento de Engenharia Mecânica, por toda a estrutura, aulas e professores de qualidade que contribuíram para o meu crescimento e para me tornar quem eu sou. O autor agradece ao CNPq processo 402730/2023-2.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que me ajudaram e me apoiaram nesta jornada, pois, como a Bíblia diz, os amigos são como uma fiel proteção e um remédio para a vida.

Devido à sua ampla vantagem na fabricação de peças complexas, em comparação a processos convencionais, a manufatura aditiva (MA) vem tornando-se um processo cada vez mais significativo, sendo extensivamente utilizado nas indústrias aeroespaciais e aeronáuticas. Apesar da sua alta popularidade, nos moldes de produção atual a MA de materiais metálicos enfrenta problemas como superfícies irregulares, fazendo com que processos de pós-processamento sejam quase que obrigatório. Existem diversas opções de pós-processamento para peças feitas por MA, sendo o fresamento um dos principais, pois esse é o tipo de usinagem mais efetivo para a diminuição da rugosidade, considerado uma das qualidades superficiais mais importantes para as peças, em virtude das suas diversas aplicações como tolerância, corrosões, fadigas e transmissão de calor, por essa razão o estudo sobre as grandezas físicas do fresamento torna-se essencial na busca de menores rugosidades. Em decorrência desses fatos, o presente estudo visa o comparativo de diferentes velocidades de corte, considerada uma das mais importantes grandezas na usinagem e a relação da direção de fresamento em relação a deposição do material, sendo um assunto pouco abordado na literatura. Realizaram-se ensaios de fresamento no material ER70S-6, fabricada via MADA. Os ensaios foram conduzidos utilizando uma fresa de metal duro revestida com TiAlN, com duas velocidades de corte: 10 m/min e 40 m/min. Além disso, foram exploradas duas direções de usinagem, tanto paralela quanto perpendicular à deposição do material. Como resultado, observou-se uma diminuição da rugosidade Ra em até 95% na direção paralela e 86% na direção perpendicular. Todos os ensaios resultaram em aumento da dureza do material, especialmente no sentido perpendicular a 40 m/min, ocasionando um aumento de até 19%, elevando a dureza de 138 HB para 166 HB. As análises microscópicas das superfícies revelaram resultados satisfatórios, com poucas rebarbas, independentemente da direção do fresamento. No entanto, foram observadas algumas descontinuidades, principalmente no início dos canais usinados na direção paralela, e evidências de *chatter* no canal usinado perpendicularmente a 40 m/min. Em conclusão, este estudo permite afirmar que canais usinados paralelamente apresentam menores rugosidades, independentemente da velocidade de corte.

Palavras-chaves: Manufatura Aditiva, Usinagem, Fresamento, Velocidade de Corte, Direção de Fresamento.

ABSTRACT

Due to its wide advantage in the fabrication of complex parts, compared to conventional processes, additive manufacturing (AM) is becoming an increasingly significant process, being extensively used in the aerospace and aeronautical industries. Despite its high popularity, in current production molds AM faces problems such as uneven surfaces, making post-processing processes almost mandatory. There are several post-processing options for parts made by AM, milling being one of the main ones, as this is the most effective type of machining for reducing roughness, considered one of the most important surface qualities for parts, due to its several applications such as tolerance, corrosion, fatigue and heat transmission, for this reason the study of the physical quantities of milling becomes essential in the search for lower roughness. As a result of these facts, the present study aims at comparing different cutting speeds, considered one of the most important parameters in machining, and the relationship between milling direction and material deposition direction, which is a subject rarely addressed in the literature. For this, milling tests will be carried out on the ER70S-6 material, manufactured via additive manufacturing by arc deposition. The tests were conducted using a TiAlN-coated carbide end mill, with two cutting speeds: 10 m/min and 40 m/min. Additionally, two machining directions were explored, both parallel and perpendicular to the material deposition. As a result, a decrease in Ra roughness was observed by up to 95% in the parallel direction and 86% in the perpendicular direction. All tests resulted in an increase in material hardness, especially in the perpendicular direction at 40 m/min, causing an increase of up to 19%, raising the hardness from 138 HB to 166 HB. Microscopic surface analyses revealed satisfactory results, with few burrs, regardless of the milling direction. However, some discontinuities were observed, mainly at the beginning of machined channels in the parallel direction, and evidence of chatter in the channel milled perpendicular to 40 m/min. In conclusion, this study affirms that channels machined parallelly exhibit lower roughness, regardless of the cutting speed.

Key-words: Additive Manufacturing, Machining, Milling, Cutting Parameters, Cutting Speed, Milling Direction.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	3
1.2	OBJETIVO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	A USINAGEM	5
2.2	PROCESSOS CONVENCIONAIS DE USINAGEM	5
2.2.1	Torneamento	6
2.2.2	Furação	8
2.2.3	Fresamento	9
2.3	GRANDEZAS FÍSICAS NO PROCESSO DE USINAGEM	9
2.3.1	Movimento, Direção e Percurso	10
2.3.2	Velocidade	12
2.3.3	Avanço e Penetração	14
2.3.4	Cavaco: Definição, tipos e formas	17
2.4	FLUIDO DE CORTE	20
2.5	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	21
2.5.1	Rugosidade	22
2.6	FRESAMENTO	24
2.6.1	Fresamento de topo	25
2.6.2	Forças de corte no fresamento	26
2.6.3	Rugosidade de peças fresadas	28
2.7	MANUFATURA ADITIVA DE METAL	32
2.7.1	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco	35
2.7.2	Microestruturas de Materiais Impressos por CMT	36
2.8	FRESAMENTO DE MATERIAIS IMPRESSOS POR CMT	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
3.2	PEÇA UTILIZADA	47

3.3	MÁQUINA FERRAMENTA	48
3.4	FERRAMENTA DE CORTE	50
3.5	FLUIDO DE CORTE	51
3.6	PARÂMETROS DE CORTE	53
3.6.1	Direção de corte	54
3.7	VARIÁVEIS DE SAÍDA.....	56
3.7.1	Análise Superficial	56
3.7.2	Rugosidade	56
3.7.3	Dureza	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	RUGOSIDADES	59
4.2	DUREZA	68
4.3	ANÁLISE SUPERFICIAL	72
4.3.1	Análise da Ferramenta de Corte	80
5	CONCLUSÕES	82
6	REFERÊNCIAS	84
7	ANEXO	93
7.1	ESPECIFICAÇÕES DA FERRAMENTA DE CORTE.....	93
7.2	ESPECIFICAÇÃO DO ER70S-6	94
7.3	ESPECIFICAÇÃO DA VEGA XH7132	95
7.4	ESPECIFICAÇÃO DO FLUIDO BIO100E.....	96

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: TENDÊNCIA DE BUSCA DO TERMO “ADDITIVE MANUFACTURING” DE 2004 ATÉ 2023.	1
FIGURA 2: EXEMPLOS DE APLICAÇÕES: A) VÁLVULA FEITA POR MA (BRAMM, 2017), B) BICO DE COMBUSTÍVEL FEITO POR MA (BILLY, 2017).	2
FIGURA 3: TURBINA FEITA POR MANUFATURA ADITIVA (MODERN, 2019).	2
FIGURA 4: RESULTADOS DA USINAGEM EM UMA PEÇA FABRICADA POR MANUFATURA ADITIVA. ADAPTADO DE DECAPAGGIO (2020).	3
FIGURA 5: CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO. ADAPTADO (ROCHA, BACCI, 2004).	6
FIGURA 6: PRINCIPAIS OPERAÇÕES EXECUTADAS NO TORNO. ADAPTADO (MACHADO, COELHO, ABRÃO ET AL., 2015).	7
FIGURA 7: OPERAÇÕES DE FURAÇÃO: A) ESCAREAMENTO, B) TREPANAÇÃO, C) REBAIXAMENTO, D) ALARGAMENTO, E) CENTRALIZAÇÃO E F) FACEAMENTO. ADAPTADO (GROOVER, 2020).	8
FIGURA 8: FRESAMENTO FRONTAL E TANGENCIAL. ADAPTADO (ARAUJO, MOUGO, CAMPOS, 2020).	9
FIGURA 9: DIREÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CORTE, DE AVANÇO E EFETIVO NA FURAÇÃO E NO FRESAMENTO. ADAPTADO (MACHADO, COELHO, ABRÃO ET AL., 2015).	11
FIGURA 10: PERCURSO DE CORTE L_c , PERCURSO DE AVANÇO L_f E PERCURSO EFETIVO L_e PARA O FRESAMENTO DISCORDANTE (MACHADO, SILVA, 2004).	12
FIGURA 16: CAVACO CONTÍNUO DE AÇO AISI 1045 (JASPER, DAUTZENBERG, 2002)	18
FIGURA 17: CAVACO DE CISALHAMENTO (DE ASSIS, BAZANINI, RODRIGUES ET L., 2010).	18
FIGURA 18: CAVACOS DESCONTÍNUOS (CHILDS, 2000).	19
FIGURA 19: FORMAS DE CAVACO ISO 3685(1993).	19
FIGURA 20: APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE NO PROCESSO DE USINAGEM (RUDNIK, 2008).	20
FIGURA 21: CLASSIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL. ADAPTADO DE MACHADO ET AL. (2009).	21
FIGURA 22: RELAÇÃO ENTRE A RUGOSIDADE MÉDIA E O COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO DE CALOR (GONZÁLEZ, 1998).	23

FIGURA 23: REPRESENTAÇÃO DE PICOS, VALES E ESPAÇAMENTOS DE PERFIS (JUNEJA, SWKHON, 1987).	23
FIGURA 24: EXEMPLO DE OPERAÇÕES TÍPICAS DE FRESAMENTO (COELHO, DA SILVA, 2018).	24
FIGURA 25: EXEMPLOS DE FERRAMENTAS USADAS NO FRESAMENTO DE TOPO: A) DE CANTO VIVO; B) ESFÉRICA; E RANHURAS EM T (COROMANT, 2009).....	25
FIGURA 26: PROBLEMAS DEVIDO A DEFLEXÃO DO EIXO DA FERRAMENTA. ADAPTADO (TRENT, 1985).....	26
FIGURA 27: COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM SEGUNDO OS SISTEMAS DE COORDENADAS NA FERRAMENTA E NA PEÇA (CAMACHO, 1991).	27
FIGURA 28: COMPORTAMENTO DA FORÇA F_y PARA DIFERENTES NÚMEROS DE DENTES (WECK, 1996).....	27
FIGURA 29: PERFIL TEÓRICO DE SUPERFÍCIE USINADA POR FRESAMENTO FRONTAL (MACHADO, ABRÃO, COELHO ET AL. 2009).	29
FIGURA 30: INTERAÇÃO DO AVANÇO E VELOCIDADE DE CORTE NOS VALORES DA RUGOSIDADE. ADAPTADO DE YASIR (2016).....	30
FIGURA 31: MICROGRAFIA DOS TESTES COM VELOCIDADE DE CORTE DE $V=100\text{M}/\text{MIN}$ A) 0.12MM/REV ADAPTADO DE YASIR (2016). B)0.14 MM/VER, 31	
FIGURA 32: INTERAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE, AVANÇO E PROFUNDIDADE NO VALORES DA RUGOSIDADE, ADAPTADO DE TRUNG (2020).	31
FIGURA 33: ESQUEMA DA MA: A) MODELO CAD 3D; B) DIVISÃO POR CAMADAS; C) DEPOSIÇÃO DAS CAMADAS (ALBERTI, SILVA, D'OLIVEIRA, 2014).....	32
FIGURA 34: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM PROCESSO DED COM FEIXE DE ELÉTRONS E ARAME. ADAPTADO (SCIAKY, 2021).	34
FIGURA 35: SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE ENERGIA DIRETA (DASS; MORIDI, 2019).....	34
FIGURA 36: CURVAS ESQUEMÁTICAS CARACTERÍSTICAS IDEALIZADAS DE VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO, CORRENTE E TENSÃO E SUAS FASES RESPECTIVAS DO MODO OPERACIONAL CMT (KAZMAIER; ARTELSMAIR, 2007).	36
FIGURA 37: MICROESTRUTURA DA PRIMEIRA AMOSTRA COM LENTE 50X (OLIVEIRA,2022). .	37
FIGURA 38: MICROESTRUTURA DA SEGUNDA AMOSTRA COM LENTE 50X (OLIVEIRA,2022). .	37
FIGURA 39: MICROESTRUTURA DA AMOSTRA COM LENTE 20X. ADAPTADO DE DAS, PANDA E DIXIT (2022).	38

FIGURA 40: ANÁLISE DE ACABAMENTO DE SUPERFÍCIE CANAL 1 E 4, ADAPTADO DE BARRETO (2022).	39
FIGURA 41: RELAÇÃO ENTRE OS CINCO CANAIS E AS RUGOSIDADES Ra , Rq E Rz (BARRETO, 2022).	40
FIGURA 42: MICROGRAFIA DO CANAL 1 ($V_c=10M/MIN$) NO SENTIDO CONCORDANTE (ÁVILA ET AL.,2023).	42
FIGURA 43: MICROGRAFIA DO CANAL 4 ($V_c = 40M/MIN$) NO SENTIDO DISCORDANTE NA ESQUERDA E CONCORDANTE NA DIREITA (ÁVILA ET AL.,2023).	42
FIGURA 44: COMPARATIVA DA DUREZA ENTRE OS DEZ CANAIS E A AMOSTRAGEM (ÁVILA ET AL.,2023).	43
FIGURA 45: IMAGENS DOS CANAIS USINADOS: A) FRESADO COM UM BOCAL À 45° E COM VAZÃO DE 20 L/MIN. B) FRESADO COM BOCAL À 45° E COM VAZÃO DE 10 L/MIN (RIBEIRO ET AL.2023).	44
FIGURA 46: DIAGRAMA BPMN DAS ETAPAS PARA A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	46
FIGURA 47: FIGURA REPRESENTATIVA DAS DIMENSÕES DA PEÇA EM MM.	48
FIGURA 48: MÁQUINA DE USINAGEM VERTICAL VEGA XH7132.	48
FIGURA 49: FIXAÇÃO E POSICIONAMENTO DOS ELEMENTOS PARA REALIZAÇÃO DO FRESAMENTO (RIBEIRO ET AL.2023).	50
FIGURA 50: FRESA G9A69050 DA YG-1(YG-1 CO, 2023).	50
FIGURA 51: VALORES DE RUGOSIDADE MÉDIA PARA OS TESTES. ADAPTADO DE RIBEIRO (2023).	52
FIGURA 52: REPRESENTAÇÕES DO FLUIDO DE CORTE, A) ESQUEMA DE CONFIGURAÇÕES DOS BOCAIS DE FLUIDO DE CORTE. B) BOCAIS DE SAÍDA DE FLUÍDO DE CORTE UTILIZADOS NO EXPERIMENTO. ADAPTADO DE RIBEIRO (2023).	53
FIGURA 53: DIREÇÃO DO FRESAMENTO NO SENTIDO PARALELO A DEPOSIÇÃO DO ARCO. ADAPTADO DE ÁVILA (2023).	55
FIGURA 54: DIREÇÃO DO FRESAMENTO NO SENTIDO PERPENDICULAR A DEPOSIÇÃO DO ARCO. ADAPTADO DE ÁVILA (2023).	55
FIGURA 55: MICROSCÓPIO DE MEDIÇÃO 3D A LASER LEXT OLS4100 DA OLYMPUSLEXT (OLYMPUS, 2013).	56
FIGURA 56: – RUGOSÍMETRO MODELO SJ-201 DA MITUTOYO (SEG, 2022).	57
FIGURA 57: PROCESSO DE MEDIÇÃO COM O RUGOSÍMETRO SJ-210 (MITUTOYO,2023).	57
FIGURA 58: DURÔMETRO ZWICK ROELL ZHU250 (ZWICK, 2023).	58
FIGURA 59: COMPARATIVO DA SUPERFÍCIE COM O MAIOR E MENOR RESULTADO DE RA.	60

FIGURA 60: VALORES DA RUGOSIDADE RA PARA CADA ENSAIO.	61
FIGURA 61: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE RA PARA OS ENSAIOS NA DIREÇÃO PARALELA E PERPENDICULAR A DEPOSIÇÃO.	62
FIGURA 62: BOXPLOT - RUGOSIDADE RA NO SENTIDO PERPENDICULAR.	62
FIGURA 63: BOXPLOT - RUGOSIDADE RA NO SENTIDO PARALELO.	63
FIGURA 64: VALORES DA RUGOSIDADE RZ PARA CADA ENSAIO.	64
FIGURA 65: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE RZ PARA OS ENSAIOS NA DIREÇÃO PARALELA E PERPENDICULAR A DEPOSIÇÃO.	65
FIGURA 66: BOXPLOT - RUGOSIDADE RZ NO SENTIDO PERPENDICULAR.	65
FIGURA 67: BOXPLOT - RUGOSIDADE RZ NO SENTIDO PARALELO.	66
FIGURA 68: VALORES DA RUGOSIDADE RQ PARA CADA ENSAIO.	67
FIGURA 69: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE RQ PARA OS ENSAIOS NA DIREÇÃO PARALELA E PERPENDICULAR A DEPOSIÇÃO.	67
FIGURA 70: GRÁFICO DA DUREZA REGISTRADA NOS CANAIS E NA SUPERFÍCIE DA PEÇA.	69
FIGURA 71: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE DUREZA BRINELL PARA A SUPERFÍCIE E OS ENSAIOS NA DIREÇÃO PARALELA E PERPENDICULAR A DEPOSIÇÃO.	70
FIGURA 72: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE DUREZA PARA CADA TIPO DE ENSAIO.	71
FIGURA 73: A) MICROGRAFIA CANAL Pe1 EM 10X. B) MAPA DE CALOR 2D. C) MAPA DE CALOR 3D	72
FIGURA 74: A) DEFEITOS DESTACADOS NO CANAL Pe1 EM 10X. B) DEFEITOS DESTACADOS PELO AUTOR RIBEIRO (2022).	73
FIGURA 75: ANÁLISE DE REBARBAS NO CANAL Pe1.	73
FIGURA 76: MICROGRAFIA CANAL PA1.	74
FIGURA 77: A) DEFEITO, ORIUNDO DA DEPOSIÇÃO, ENCONTRADO NO CANAL PA1. B) DEFEITOS ENCONTRADOS PELO AUTOR RIBEIRO (2022)	74
FIGURA 78: DIFERENTES PARTES DO CANAL PA1 A) INÍCIO. B) MEIO. C) FINAL.	75
FIGURA 79: CANAIS 2 FRESADOS EM 10 M/MIN: A) CANAL PA2. B) CANAL Pe2. C) MAPA DE CALOR DO CANAL PA2. D) MAPA DE CALOR DO CANAL Pe2.	76
FIGURA 80: CAVACO NA SUPERFÍCIE DO CANAL Pe2.	76
FIGURA 81: ANÁLISE DE REBARBAS: A) CANAL Pe2. B) CANAL PA2.	77
FIGURA 82: A) CANAL CONCORDANTE E DISCORDANTE DO AUTOR AVILA (2022). B) CANAL Pe3.	78
FIGURA 83: DIFERENTES PARTES DO CANAL PA1 A) INÍCIO. B) MEIO. C) FINAL.	78
FIGURA 84: IMPERFEIÇÕES NO INÍCIO DO CANAL PA3.	79

FIGURA 85: CANAIS 4 FRESADOS COM $V_c = 40$ M/MIN. A) CANAL PE4. B) CANAL PA4.	79
FIGURA 86: COMPARATIVO ENTRE OS CANAIS PE4 E PA4.....	80
FIGURA 87: PONTO DE CORTE DA FERRAMENTA DEPOIS DE TODOS OS ENSAIOS.....	81
FIGURA 88: DESGASTE DA FERRAMENTA DE DIFERENTES ÂNGULOS.....	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PRINCIPAIS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE. ADAPTADO DE MACHADO ET AL. (2009).	28
TABELA 2: PARÂMETROS DE CORTE DOS ENSAIOS. ADAPTADO DE ÁVILA (2023).	41
TABELA 3: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ARAMES ER70S-6. ADAPTADO LINCOLN (2011).....	47
TABELA 4: PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ARAME ER70S-6. ADAPTADO LINCOLN (2011).	47
TABELA 5: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS VEGA XH7132 (MADRAS, 2022).....	49
TABELA 6: ESPECIFICAÇÕES DA FRESA G9A69050 DA YG-1(YG-1 CO, 2023).....	51
TABELA 7: TABELA DE CONCENTRAÇÕES DO FLUIDO BIO100E (BQL, 2021)	51
TABELA 8: CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO FLUIDO BIO100E (BQL, 2021).	52
TABELA 9: PARÂMETROS DE CORTE PARA OS ENSAIOS.	54
TABELA 10: PARÂMETROS DE CORTE DOS ENSAIOS	54
TABELA 11: VALORES DA RUGOSIDADE RA PARA CADA ENSAIO.	59
TABELA 12: VALORES DA RUGOSIDADE RZ PARA CADA ENSAIO.	63
TABELA 13: VALORES DA RUGOSIDADE RQ PARA CADA ENSAIO.	66
TABELA 14: VALORES DE DUREZA BRINELL DOS CANAIS.	68

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

L_c	Percurso de corte
L_f	Percurso de avanço
L_e	Percurso efetivo
v_c	Velocidade de corte
d	Diâmetro
n	Número de rotações por segundo
v_f	Velocidade de avanço
f	Avanço
z	Número de dentes
f_z	Avanço por dente
f_c	Avanço por corte
f_e	Avanço efetivo
φ	Ângulo da direção de avanço
η	Ângulo da direção efetiva
a_p	Profundidade de direção efetiva
a_e	Profundidade de trabalho
a_f	Penetração de trabalho
F_x	Força na direção X
F_y	Força na direção Y
F_z	Força na direção Z
F_c	Força de corte
F_r	Força na direção radial
F_{ax}	Força na direção axial
r_e	Raio da ponta
R_a	Rugosidade média
R_q	Rugosidade por Desvio Aritmético Médio
R_t	Rugosidade por Altura Total do Perfil

R_z	Rugosidade por Altura Máxima do Perfil
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil (skeumess)
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil
Pa	Canal usinado na direção paralela a deposição
Pe	Canal usinado na direção perpendicular a deposição

SIGLAS E ABREVIATURAS

HSM	<i>High Speeds Machining</i> (usinagem em altas velocidades)
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
MA	Manufatura Aditiva
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
FLP	<i>Power Bed Fusion</i> (Fusão em leito de pó)
JL	<i>Binder Jetting</i> (Jato de ligante)
DED	<i>Direct Energy Deposition</i> (Deposição por energia direcionada)
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Atualmente, é comum e considerado simples a ideia de construir protótipos feitos por métodos aditivos de fabricação, porém só a partir da década de 80 que a manufatura aditiva (MA) começou a se tornar popular, com o crescimento do CAD (*Computer-Aided-Designs*), que levou de forma rápida e eficaz, modelagens de projetos mecânicos. A MA tornou possível a criação de peças de alta complexidade para os métodos tradicionais que consideravam certos protótipos difíceis ou até impossíveis (SILVA, 2020; GOMES, WILTGEN, 2020).

Esse destaque da manufatura aditiva é percebido também no Google Trends, método de pesquisa de assuntos em destaques ao longo dos anos, no qual mostra um notável crescimento da procura pelo termo “*Additive Manufacturing*” (SILVA, 2020), a Figura 1 contém o gráfico de procura atualizado. Toda essa popularização levou o crescimento da fabricação de componentes através da fabricação aditiva, de forma que o mercado mundial obteve um crescimento de US\$ 4,1 bilhões em 2004 para US\$ 10,4 bilhões em 2019 (LAUE, 2022).

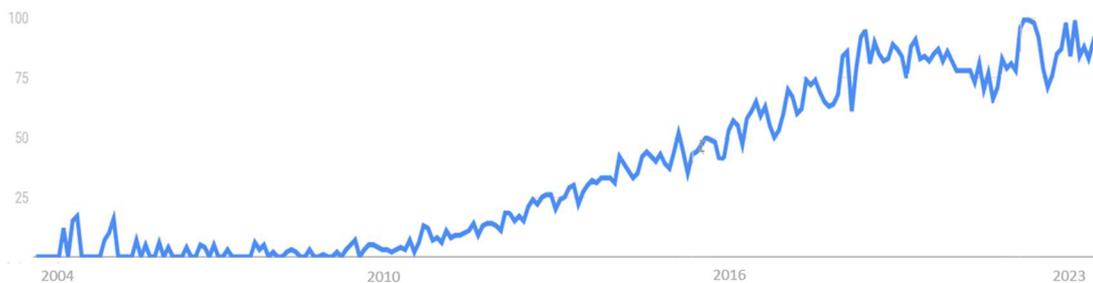


Figura 1: Tendência de busca do termo “Additive Manufacturing” de 2004 até 2023.

Os autores Gomes e Wiltgen (2020) comentam exemplos da indústria que vem utilizando-se da MA, como as indústrias aeroespaciais e aeronáutica que são tipos de indústrias que tem certo grau de exigência para suas peças, como pouco peso, complexidade geométrica e altas resistências. Na figura 2 a) é observado uma válvula feita por MA, pela Liebherr Aerospace, em que obtiveram um benefício da redução em 35% do peso em comparação a fabricação por métodos tradicionais, já a Figura 2 b) traz o bico de combustível feito por MA pela GE.

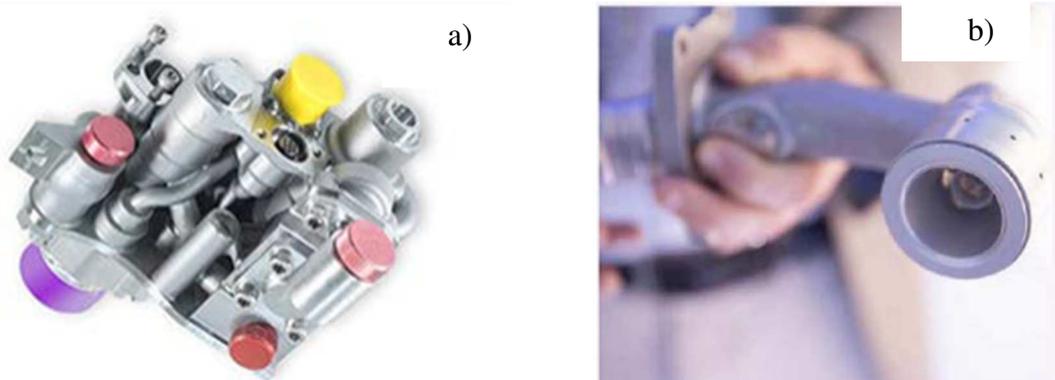


Figura 2: Exemplos de aplicações: a) válvula feita por MA (BRAMM, 2017), b) bico de combustível feito por MA (BILLY, 2017).

A popularização levou a MA a um crescimento e desenvolvimento contínuo do método, porém todos esses fatores ainda não garantem o fim do pós-processamento devido a importantes fatores, como peças com pouca qualidade superficial com inúmeros poros e trincas, tornando-se os processos de usinagem quase inevitável nos moldes de produção atuais (LAUE, 2022; LOPES et al.,2020). Na Figura 3 é possível ver uma turbina feita por MA, percebe-se a necessidade do pós-processamento devido a sua superfície rugosa.



Figura 3: Turbina feita por Manufatura Aditiva (MODERN, 2019).

Para os problemas enfrentados com relação ao acabamento superficial, o fresamento vem como uma resposta, pois dentre todos os processos de usinagem é considerado pelo autor Stermmer (1992) como um dos mais vantajosos, resultado da sua alta qualidade superficial e grandes taxas de remoções do material. Na Figura 4 são observados os resultados superficiais na peça após um pós-processamento de usinagem.



Figura 4: Resultados da usinagem em uma peça fabricada por manufatura aditiva. Adaptado de Decapaggio (2020).

Deste modo, o estudo visando a otimização do processo de fresamento para peças metálicas feitas por MA é fundamental na busca de redução de custos, tempo de fabricação e uma maior qualidade final do produto.

1.1 Motivação

Sabendo que o pós-processamento vem como respostas ao baixo acabamento da manufatura aditiva a arco, torna-se essencial o aprofundamento e compreensão dos métodos disponíveis. Com isto a investigação do fresamento, considerado um dos métodos mais importantes, e como seus parâmetros afetam as peças tem suma importância. Este trabalho visa colaborar cientificamente para compreensão dos efeitos do fresamento em peças metálicas feitas por MA, por exemplo avaliando a influência da usinagem nas direções paralela e perpendicular à deposição atreladas a diferentes velocidades de corte podem interferir na qualidade superficial, rugosidade e dureza da peça. Este estudo visa estudar um tópico pouco abordado na literatura, além de contribuir com o pós-processamento de peças feitas por MA. O trabalho pode servir de base para futuras pesquisas e aplicações práticas, tanto na área acadêmica como na industrial.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da direção de fresamento em relação a de deposição e a velocidade de corte em peças de ER70S-6 obtidas por MADA. A análise foi feita a partir das seguintes variáveis de saída:

- Rugosidade (R_a , R_q , e R_z) das superfícies usinadas;
- Análise microscópica das superfícies usinadas: verificação de trincas, poros e arrancamentos;
- Análise macroscópica da superfície usinadas;
- Dureza Brinell das superfícies usinadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Usinagem

O uso da remoção de material para obtenção de geometrias sempre esteve presente na história da humanidade. Com a chegada da Revolução Industrial tornou-se possível o desenvolvimento de novos materiais para o corte e acabamento de peças para engenharia, como ferramentas de corte de aço-liga. Mais à frente criou-se as máquinas movidas a vapor, que dentre as diversas aplicações poderiam fabricar instrumentos e antepor o trabalho humano. Grande parte das peças fabricadas eram de materiais de alta usinabilidade, que poderiam ser usinados por ferramentas de aço carbono, material acessível para as ferramentas na época, possuindo então pouca durabilidade. O que ocasionou o homem, no século XX, com os novos materiais, mais estáveis, e de menor usinabilidade, buscar novos materiais para as ferramentas de usinagem (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015).

A usinagem é de grande importância sendo considerado o processo de fabricação mais famoso do mundo, empregando grande quantidade de pessoas (TRENT, 1985). A partir de 1940, diferentes tipos de usinagem surgiram, sendo chamados de processos não convencionais de usinagem, no qual ganharam seu espaço devido a aptidão de produzir peças complexas em materiais com níveis difíceis de usinar (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015).

A necessidade de uma manufatura de metal mais eficiente tornou-se o principal objetivo com o mercado cada vez mais competitivo, ou seja, fez-se necessário tomar decisões precisas na indústria de manufatura. Isso torna-se ainda mais crítico quando fala-se em usinagem, em que a tempos se busca a otimização de parâmetros de cortes, procurando processos que aumentem a produtividade. Essa melhora nos processos de corte é limitada à escolha das ferramentas corretas com base em avanços, profundidades e velocidade coerentes com a usinagem aderida (COPPINE, BAPTISTA, 1998).

2.2 Processos Convencionais de Usinagem

A classificação dos processos de fabricação de metais segue a metodologia que os divide em dois grandes grupos: um grupo no qual entram processos com remoção de cavacos e outro em que entram os processos sem a remoção destes (COSTA, SANTOS, 2006). Entende-se por conformação processos como objetivo de conferir a peça dimensão, forma ou acabamento trabalhando por deformações plásticas do metal conformado (FERRARESI, 2018). A operação

de usinagem é a ação de conferir o acabamento, forma ou dimensão produzindo cavaco (BORGES, 2009), sendo o cavaco uma parte do material retirada no processo de usinagem, além de ter uma geometria irregular que depende de alguns fatores determinantes no processo, como aresta postiça do corte, recalque, entre outros (FERRARESI, 2018).

Na usinagem existe uma subdivisão de processos, são eles os convencionais, processos de corte com usinagem tradicional, como torneamento, fresamento e furação, e os processos não convencionais como por exemplo jato de água abrasivo e feixes de elétrons (YUSUP; ZAIN; HASHIM, 2012), pode-se observar as classificações dos processos de fabricação na Figura 5. Segundo Arrazola et al. (2013), na contemporaneidade os processos convencionais de usinagem ocupam uma parcela relevante nos processos de fabricação, sendo estes prevaletentes em todas as operações de usinagem. As técnicas convencionais de torneamento, furação e fresamento são as mais utilizadas nas confecções de peças (SHAW, CLAYTON; COOKSON et al., 2005). Nos itens 2.2.1 a 2.2.3 serão apresentados alguns dos principais processos de usinagem convencional.

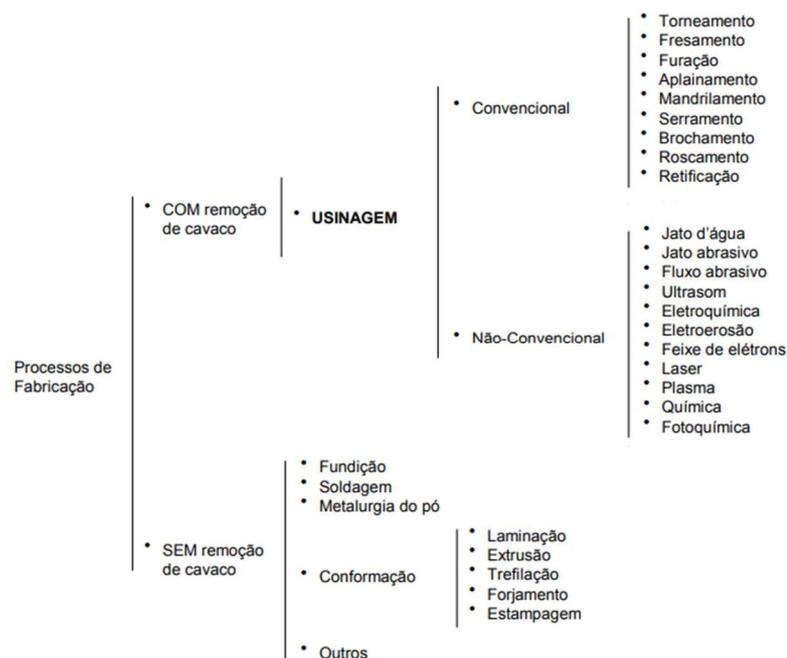


Figura 5: Classificação dos processos de fabricação. Adaptado (ROCHA, BACCI, 2004).

2.2.1 Torneamento

Segundo Trent (1985), o processo de torneamento é o tipo de usinagem mais aplicado no corte de metais. É uma técnica em que a peça gira em torno do eixo principal da máquina enquanto a ferramenta se desloca segundo uma trajetória coplanar com o eixo, em vista disso,

o uso deste tipo de processo é associado à obtenção de superfícies de revolução (BORGES, 2009). Groover (2020) complementa que o torneamento é efetuado em máquina chamada torno que provê energia para o movimento giratório a uma certa velocidade de rotação da peça, de modo que, avança a ferramenta de corte a uma profundidade específica adimplindo o corte. Na técnica de corte, a peça é fixada no mandril do torno enquanto a ferramenta é mantida rigidamente. No torneamento os principais parâmetros são o avanço, velocidade e profundidade de corte, todos eles são ajustados pelo operador (TRENT, 1985).

Encontram-se diferentes tipos de torneamento, cada um com suas respectivas particularidades (GROOVER, 2020), porém esse processo divide-se em dois grandes grupos que são chamados de torneamento retilíneo ou curvilíneo, sendo o torneamento retilíneo o processo no qual a trajetória da ferramenta durante a operação é retilínea e o curvilíneo a trajetória é curvilínea. Pode-se fazer outra subdivisão quanto ao tipo de torneamento quando o foco é a finalidade do processo, nesse quesito o processo é dividido em torneamento de desbaste e torneamento de acabamento, onde por acabamento é para obtenção do acabamento superficial final da peça e desbaste é com foco nas dimensões e formas aproximadamente iguais às finais (FERRARESI, 2018). Os tipos mais comuns de torneamento são o torneamento cilíndrico externo e interno, cônico externo e interno, faceamento, perfilamento, sangramento e recartilamento (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015). Pode-se observar os diferentes tipos de operações de torneamento na Figura 6

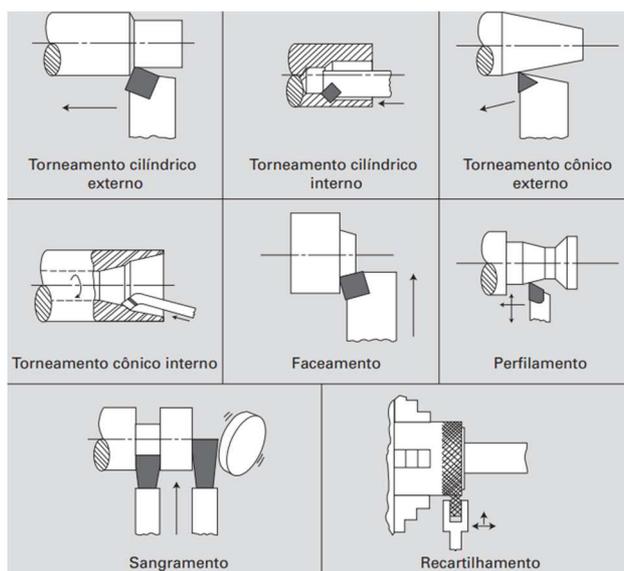


Figura 6: Principais operações executadas no torno. Adaptado (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015).

2.2.2 Furação

Atualmente, realizam-se numerosas formas de gerar furos em materiais, tendo como exemplo, furações por feixe a laser, jato de água e ultrassom, métodos que se originaram devido a questões econômicas e de qualidade do furo, contudo, o método convencional de furação ainda é o mais utilizado na indústria (EL-SONBATY, KHASHSBS, MSCHSLY, 2004). A furação convencional é uma operação de usinagem, em que uma ferramenta cilíndrica rotativa com arestas de corte, normalmente duas, em suas extremidades faz um furo de perfil redondo na superfície do material. A ferramenta utilizada nesse processo é a broca, onde usualmente utiliza-se a broca helicoidal (GROOVER, 2020).

De acordo com Borges (2009), para que o furo aconteça a ferramenta deve girar e avançar em uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela do eixo da máquina. Segundo Groover (2020), existem um grande número de operações de usinagens relacionadas com a furação, isto é, utilizando ferramentas rotativas, são elas: escareamento, trepanação, rebaixamento, alargamento, centralização e faceamento. Esquemas ilustrativos são apresentados na Figura 7.

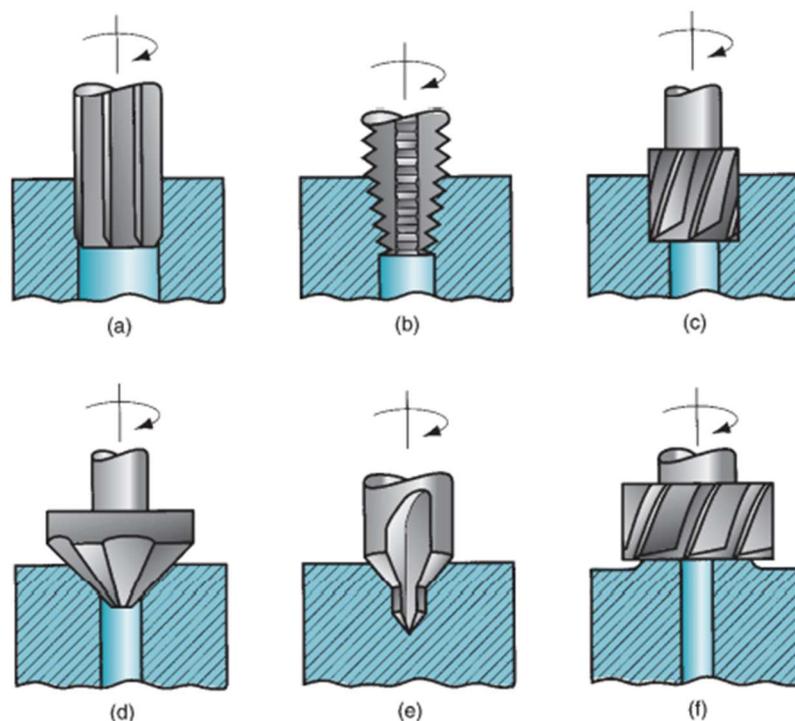


Figura 7: Operações de furação: a) Escareamento, b) Trepanação, c) Rebaixamento, d) Alargamento, e) Centralização e f) Faceamento. Adaptado (GROOVER, 2020).

2.2.3 Fresamento

O processo de fresamento é um dos mais utilizados na usinagem (AL-ZUBAIDI; GHANI; CHE HARON, 2011). Segundo Marcelino et al. (2004), ainda que seja um processo considerado complexo, é uma das metodologias de fabricação mais empregadas, em virtude da sua alta taxa de extração de material, além de confeccionar peças com boas precisões dimensionais, geométricas e com grande versatilidade. É uma técnica usada na fabricação de peças planas e curva. A máquina utilizada nesse processo é chamada de fresadora que utiliza-se de uma ferramenta de corte multiponto (SHAW, COOKSON et al., 2005). Segundo Costa et al. (2006), no processo de fresamento a ferramenta gira durante o tempo que a peça ou a ferramenta se desloca em uma trajetória qualquer.

Os dois modos mais usuais de fresamento são o frontal e tangencial, conforme exposto na Figura 8. Segundo Ferraresi (2018), o fresamento frontal é geralmente aplicado para fabricar peças com superfícies planas perpendiculares ao eixo de rotação da ferramenta, enquanto o processo tangencial visa superfícies paralelas ao eixo de rotação da sua ferramenta.

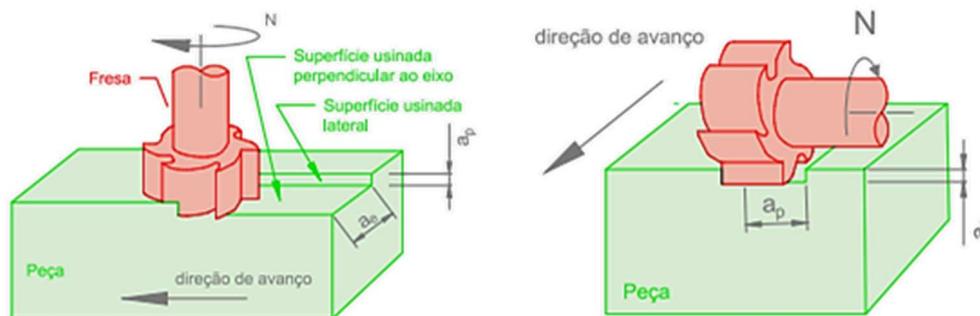


Figura 8: Fresamento frontal e tangencial. Adaptado (ARAUJO, MOUGO, CAMPOS,2020).

Além do fresamento tangencial e frontal existem vários outros tipos de fresamento, são eles os tangenciais de canais ou perfis, de topo, de topo com fresa esférica, de cavidades, além de vários utilizados na fabricação de engrenagens (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015).

2.3 Grandezas físicas no processo de usinagem

Segundo Ferraresi (2018), para um bom estudo sobre usinagem é indispensável o conhecimento de conceitos básicos, como as grandezas físicas do processo de usinagem. Assim,

para um excelente estudo as definições das grandezas físicas, como movimento, direção, e velocidades do processo, devem estar bem estabelecidas (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015). Essas definições são apresentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na norma NBR 6162 – Conceitos da Técnica de Usinagem (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2006).

2.3.1 Movimento, Direção e Percurso

A ocorrência do corte de usinagem se dá graças ao movimento relativo entre a peça e a aresta cortante da ferramenta. Esse movimento relativo entre a peça e a ferramenta é classificado em dois grupos, sendo os movimentos ativos, os que resultam em a remoção de material e os passivos que ao ocorrerem não causam remoção de cavaco (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2006).

Tipos de movimentos que segundo Machado et al. (2015) provocam diretamente a remoção de cavaco são:

- **Movimento de corte:** é um tipo de movimento simultâneo entre a aresta de corte da ferramenta e a peça (FERRARESI, 2018). Nesse tipo de movimento não se tem o avanço, e ocorre a retirada do cavaco numa única rotação ou movimento da ferramenta (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2006).
- **Movimento de avanço:** movimento simultâneo entre a aresta de corte da ferramenta e a peça, que junto com movimento de corte produz continuamente a remoção de cavaco, em repetidas rotações e cursos da aresta de corte (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2006). Os movimentos de avanço principal e lateral são alguns dos componentes que resultam no movimento de avanço (FERRARESI, 2018).
- **Movimento efetivo:** é o resultado da junção dos movimentos de avanço e de corte (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015).

Na Figura 9 pode-se observar os tipos de movimento ativo.

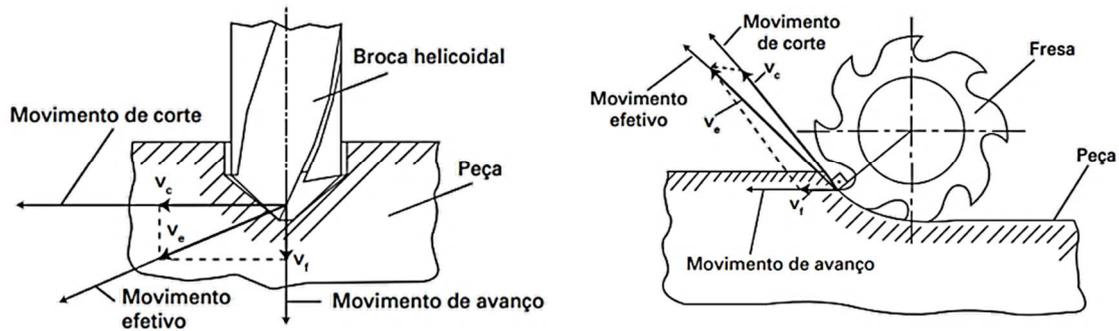


Figura 9: Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação e no Fresamento. Adaptado (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015).

Há outros tipos de movimentos que não provocam a remoção de cavaco e são de grande importância para o processo de usinagem, eles são chamados de movimentos passivos (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2006). São eles:

- **Movimentos de aproximação:** ocorre quando, antes do processo da usinagem, a peça e a ferramenta se aproximam (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015).
- **Movimentos de ajuste:** movimento que determina o quanto de material vai ser removido ou qual vai ser a profundidade do corte, é feito pelo ajuste entre a peça e a ferramenta (MACHADO, SILVA, 2004).
- **Movimento de correção:** é o movimento que corrige a posição da peça e da aresta de corte para contrapesar o desgaste da ferramenta (FERRARESI, 2018).
- **Movimento de recuo:** ocorre já no final do processo de usinagem, quando a ferramenta é distanciada da peça (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015).

Todos os movimentos, ativos e passivos, são correlacionados a direções instantâneas do movimento (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2006). Assim, tem-se as seguintes direções para os movimentos ativos: direção de corte, direção de avanço e direção efetiva.

Segundo Diniz et al. (2006), o espaçamento que a ferramenta percorre durante um tempo estabelecido é chamando de percurso, no qual cada movimento é correlacionado ao seu tipo de percurso. Assim, os principais percursos são os dos movimentos ativos, são eles:

- **Percurso de Corte:** o caminho da ferramenta sobre a peça na direção de corte (MACHADO, SILVA, 2004).
- **Percurso de Avanço:** o caminho da ferramenta sobre a peça na direção de avanço (MACHADO, COELHO, ABRÃO et al., 2015).
- **Percurso Efetivo:** o caminho da ferramenta sobre a peça na direção efetiva (FERRARESI, 2018).

A Figura 10 apresenta todos os percursos em um fresamento.

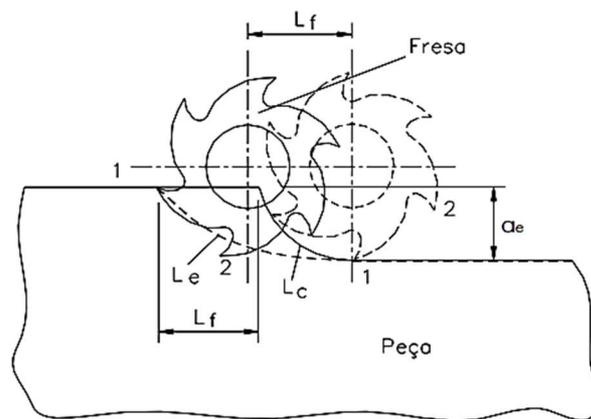


Figura 10: Percurso de corte L_c , percurso de avanço L_f e percurso efetivo L_e para o fresamento discordante (MACHADO, SILVA, 2004).

2.3.2 Velocidade

O aperfeiçoamento da velocidade na usinagem tem como resultado uma maior redução no tempo de usinagem, e a otimização deste parâmetro torna-se uma obrigatoriedade com o aumento da competitividade no setor industrial. Assim, o mercado busca uma fabricação mais eficiente, principalmente na busca da redução de tempo de fabricação (POLLI, 2005).

Dos principais parâmetros que regem a usinagem tem-se a velocidade de corte como um dos destaques juntos com o avanço e profundidade de corte (BEZERRA, MACHADO, 2008). A velocidade de corte, expressa normalmente em ft/min ou m/min (BEZERRA, MACHADO, 2008), é a velocidade no momento exato do movimento de corte no local de corte da peça, ponto de contato da ferramenta, a uma profundidade específica (SOUZA, 2011). Machado et al. (2008), citam a seguinte expressão para definir a velocidade de corte:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

d = Diâmetro da peça ou ferramenta (mm)

n = Número de rotações por minuto (rpm)

A velocidade de corte possui vários efeitos, Coppini et al. (1998) comentam que o aumento deste parâmetro pode significar numa maior remoção de cavaco resultando em alguns malefícios como o desgaste sobre a ferramenta, aumentando as trocas, entretanto, essa otimização leva a diminuição do tempo gasto na usinagem.

Outro fator influenciado pela velocidade de corte é a temperatura do processo de usinagem, Schulz (1999) mostra a influência da velocidade de corte na temperatura para alguns tipos de materiais na Figura 12.

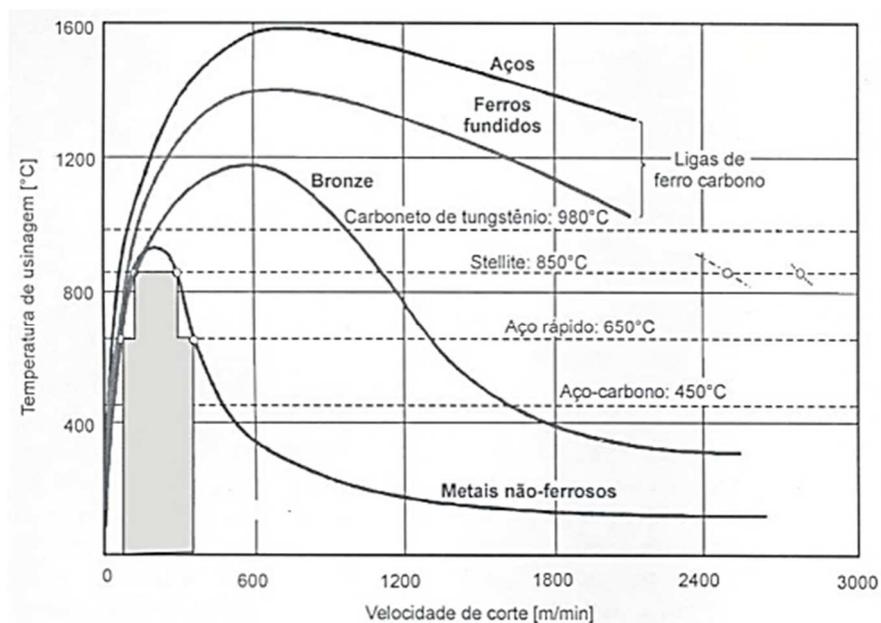


Figura 11: Temperatura em relação a velocidade de corte (SCHULZ, 1999).

Uma estratégia usada pela indústria é a usinagem em altas velocidade de corte, mesmo que embora leve a um maior desgaste para ferramentas (KALADHAR, 2020). A usinagem em altas velocidades é chamada de “*High Speed Machining*” (HSM), um tipo de usinagem que tem como consequência menores tempos de usinagem, com mais eficiência e qualidades nas peças

(PASKO, PRZYBYLSKI, 2002). A Figura 13 traz um comparativo de faixa de altas velocidades de corte diversos tipos de material.

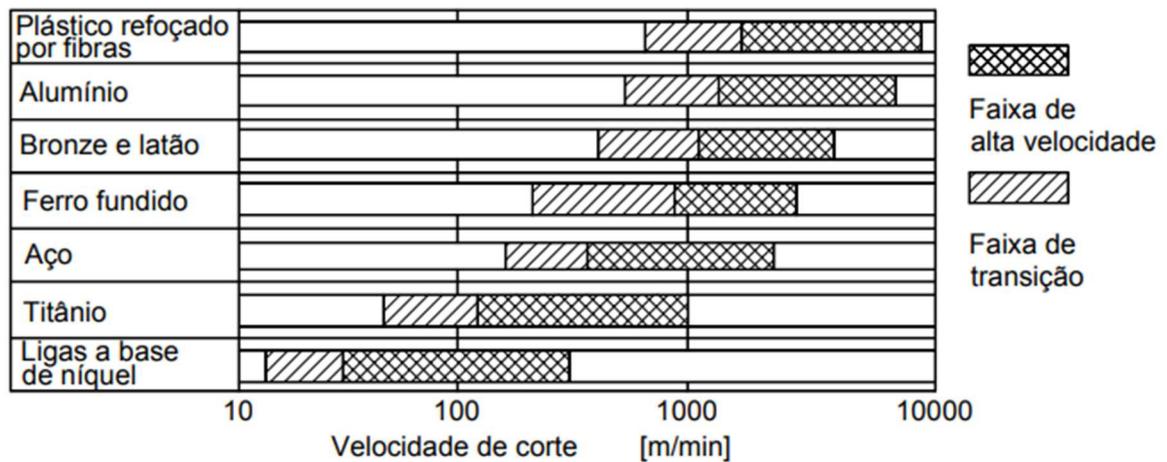


Figura 12: Faixas de velocidade de corte em função do material usinado (POLLI, 2005).

Além da velocidade de corte, outros tipos de velocidade são citados por Machado et al. (2004), como velocidade de avanço definida como uma velocidade instantânea segundo a direção de avanço. A velocidade de avanço pode ser calculada pela multiplicação da rotação da ferramenta pelo avanço (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2006):

$$v_f = f \cdot n = f \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} \quad (2)$$

Onde:

f = Avanço (mm/volta)

v_f = Velocidade de avanço (mm/min)

2.3.3 Avanço e Penetração

Segundo Ferraresi (2018), grandezas de corte são grandezas que são ajustadas na máquina onde está se realizando a usinagem, Machado et al. (2015) citam duas grandezas como avanço e penetração.

Para ferramentas que possuem mais de um dente, a grandeza do avanço (f) é a distância dada pela ferramenta em cada ciclo completo em mm/rev, porém quando a ferramenta é como uma

fresa, considera-se o avanço por dente (f_z) que é a distância de avanço de cada dente (z) (MACHADO, SILVA, 2004). Pode-se observar a expressão do avanço por dente logo na Equação 3:

$$f = f_z \cdot z \quad (3)$$

Em que:

z =Número de dentes

Segundo Machado et al. (2015), o avanço por dente ainda é subdividido em avanço de corte (f_c), medido no percurso da direção de corte, e efetivo (f_e) que é examinada na direção de corte efetivo. Esses dois tipos de avanço são expressos da seguinte forma:

$$f_c = f_z \cdot \text{sen} \varphi \quad (4)$$

$$f_e = f_z \cdot \text{sen}(\varphi - \eta) \quad (5)$$

Onde:

φ = ângulo da direção de avanço

η = ângulo da direção efetiva

Todos os tipos de avanço citados são vistos na Figura 14.

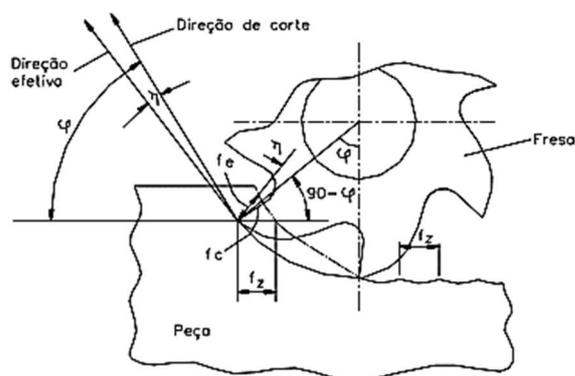


Figura 13: Avanço por dente, avanço de corte e avanço efetivo no fresamento (MACHADO, SILVA, 2004).

Já a penetração é descrita como uma grandeza que relaciona a ferramenta e a peça no sentido geométrico da penetração (SOUZA, 2011), Machado et al. (2004) citam três tipos de grandezas de penetração como a profundidade ou largura (a_p), penetração de trabalho (a_e) e penetração de avanço (a_f). A profundidade ou largura (a_p) quando analisada no sentido do processo de fresamento é ligada de duas formas, uma sendo a relação da profundidade com a ferramenta de corte, isso ocorre no fresamento tangencial, ou a largura da penetração com a ferramenta no processo frontal (SOUZA, 2011). Enquanto a penetração de trabalho (a_e) é a penetração da ferramenta de corte com a peça, essa grandeza é medida na direção do avanço em um plano de trabalho perpendicular (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2006). Por fim a penetração de avanço (a_f) é a penetração na peça, feita pela ferramenta de corte, avaliada no plano de trabalho (MACHADO, SILVA, 2004). Todas as grandezas de profundidade e largura são vistas na Figura 15.

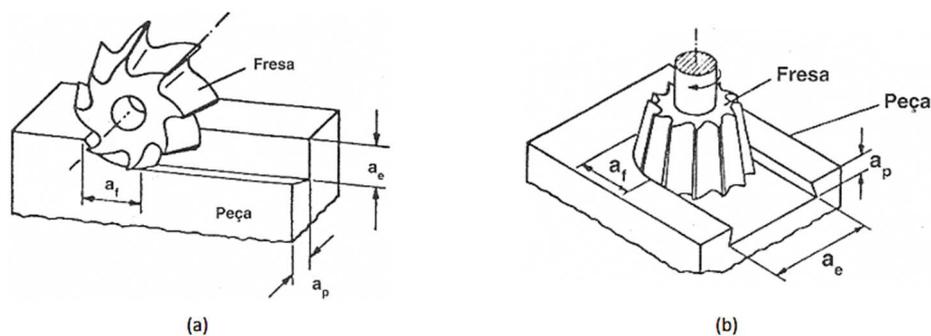


Figura 14: Grandezas de penetração no fresamento: a) tangencial ou periférico; b) frontal.

Adaptado (SOUZA, 2011).

Além desses fatores, o avanço e a penetração tem uma influência sobre o tipo e forma de cavaco (AMORIM, 2022), como se pode ver na Figura 11, onde mostra-se a variação da forma do cavaco em relação ao avanço e profundidade de corte.

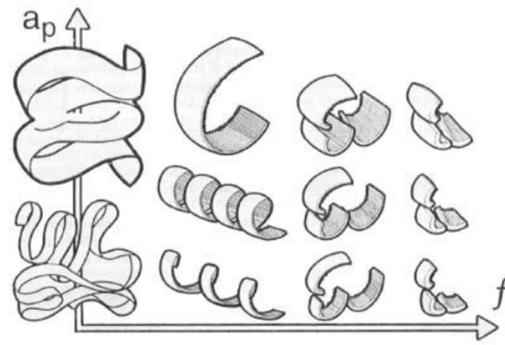


Figura 15: Variação da forma do cavaco em função das variáveis de processo (MACHADO, SILVA, 1999).

2.3.4 Cavaco: Definição, tipos e formas

Uma das consequências do processo de usinagem é a formação de cavaco que ocorre no contato da ferramenta de corte com a superfície da peça (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2010). A formação do cavaco envolve o fenômeno conhecido como deformação plástica, que surge devido ao desgaste resultante da interação entre a aresta de corte, o cavaco e a peça (DINIZ, MACHADO, CORRÊA, 2016). Além disto, essa interação gera uma grande quantidade de calor, não desejável, fazendo com que a ferramenta tenha a vida reduzida (AHMED, VELDHUIS, 2018). Desta forma, mostra-se a importância do estudo sobre os cavacos.

Segundo Ferraresi (2018), cavaco é por definição uma parte do material, com formato geométrico irregular, removido pela ferramenta de corte no processo de usinagem. Apesar de não ser o foco da usinagem, o conhecimento do tipo de cavaco é de extrema importância para o operador, pois traz uma previsão das condições do processo (CIMM, 2014). Os tipos de cavaco são influenciados por alguns fatores advindo da ferramenta ou material (BARBOSA, 2009). Machado et al. (2009) comentaram as três classificações de tipos de cavaco, são eles: cavaco contínuo, segmentado e os de ruptura.

O cavaco contínuo ocorre na usinagem de materiais dúcteis, quando há deformação na zona de cisalhamento primária, resultando numa estrutura cristalina distorcida (COOK, FINNIE, SHAW, 1954), esse tipo de cavaco possuiu camadas em uma disposição contínua (VENTURA, HASSUI, 2008). Machado et al. (2009) apontam duas desvantagens desse tipo de cavaco: danos à superfície usinada e acidentes de trabalho. É possível observar um cavaco contínuo na Figura 16.

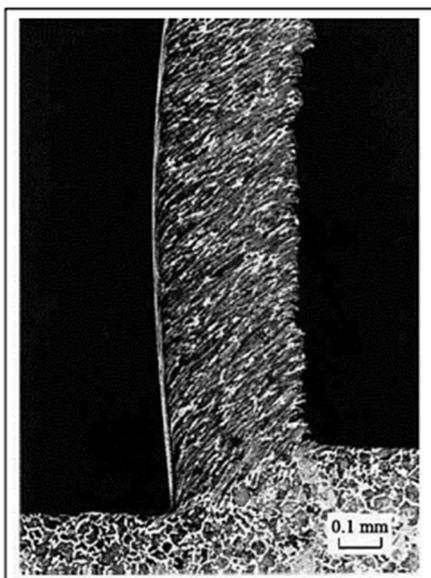


Figura 11: Cavaco contínuo de aço AISI 1045 (JASPER, DAUTZENBERG, 2002)

O cavaco semantado, são cavacos que surgem devido a não uniformidade termoplástica na zona de cisalhamento, apresentando um cavaco na forma de uma serra (KOMANDURI, VON TURKOVICH, 1981), como mostrado na Figura 17. Recht (1994) chama esse efeito de “cisalhamento termoplástico catastrófico” e afirma que esse tipo de cavaco ocorre quando temos uma usinagem com velocidade de corte alta até um nível que seja possível um “amolecimento” do material de maneira a passar o encruamento.

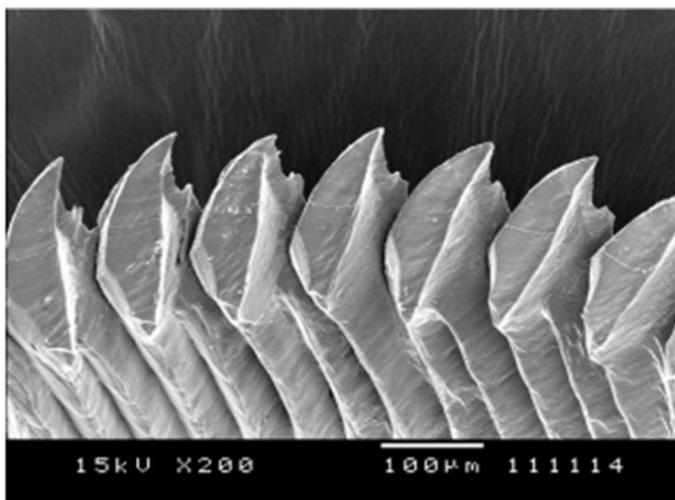


Figura 12: Cavaco de cisalhamento (De Assis, Bazanini, Rodrigues et l., 2010)

Já o cavaco descontínuo, é o tipo de cavaco que ocorre em materiais frágeis, com baixos níveis de deformação e pequena resistência, como ferro fundido (SALES, 1999; MACHADO, SILVA, 2004), porém Machado e Silva (2004) dizem em materiais considerados semi-dúcteis

pode-se ocorrer cavacos descontínuos caso a usinagem trabalhe com baixas velocidades de corte, avanços relativamente grandes e ângulos de saída menores. Pode-se observar o cavaco de ruptura na Figura 18.



Figura 13: Cavacos descontínuos (CHILDS, 2000).

A diferenciação de cavaco pode ser feita pela sua forma, a ISO 3685(1993) cita algumas formas de cavaco como cavaco espiral, tubular, fita, helicoidal, arco, fragmentado e tipo agulha. Pode-se observar as formas na Figura 19.

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruelo	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Figura 14: Formas de Cavaco ISO 3685(1993).

2.4 Fluido de Corte

O processo de usinagem requer muitas vezes uma demanda grande de energia, por consequência tem-se altas temperaturas entre a ferramenta e peça, levando a um maior desgaste da ferramenta (BYERS, 1994). Considerando esses problemas, Vieira, Machado e Ezugwu (2001) definem o fluido de corte como um acessório para aumentar a produtividade, pois a utilização do fluido de corte pode trazer alguns benefícios como o aumento da vida da ferramenta de corte, maior controle dimensional, reduções das forças de corte, diminuição da vibração e um melhor acabamento superficial (DE CHIFFRE, 1988; AVILA, ABRAO, 2001). É possível ver a aplicação fluido de corte em um processo de usinagem na Figura 20.



Figura 15: Aplicação do fluido de corte no processo de usinagem (RUDNIK, 2008).

Por mais que o fluido de corte possua diversos benefícios, ele ainda sim, traz diversos efeitos adversos, principalmente quando se trata de degradação ambiental, devido ao fato de que ele pode poluir águas e solo durante seu descarte e também pode trazer danos à pele, como dermatite, ao operador do processo (ADLER, HII, MICHALEK et al., 2006). Machado et al (2009) falam sobre 3 tipos de fluido líquidos mais comum, suas classificações são: óleos (mineral e vegetal), emulsões (semisintéticos e emulsionáveis) e soluções.

O óleo puro, mineral ou vegetal (biodegradável), apresenta uma função específica na lubrificação, possuindo um efeito de condutividade de calor muito baixa, além de ser,

frequentemente, apenas empregado em usinagem com velocidades de corte baixas. Já as emulsões, mistura de óleo e água, têm uma vantagem no quesito de resfriamento e, ademais, traz uma proteção contra ferrugem. Embora tenha benefícios em relação ao óleo puro, os óleos semissintéticos e emulsionáveis detêm de alguns malefícios, bem como grandes perdas por evaporação (ADLER et al., 2006)

2.5 Integridade superficial

O termo integridade superficial é comumente usado para dizer sobre o estado final da superfície usinada, ou seja, sua qualidade e o número de alterações sofrida por ela, esse estado final de uma superfície usinada é o fim de uma série de fatores como ruptura, deformações plásticas, recuperação elástica geração de calor, vibrações, tensões residuais e até reações químicas (MACHADO, ABRÃO, COELHO et al. 2009). O termo também abrange questões como textura superficial sua forma geométrica e outras características, como visto no diagrama da Figura 21. De maneira geral, pode-se classificar a integridade superficial na questão do acabamento da superfície e nas alterações causadas em suas camadas subsuperficiais (MACHADO, ABRÃO, COELHO et al. 2009).

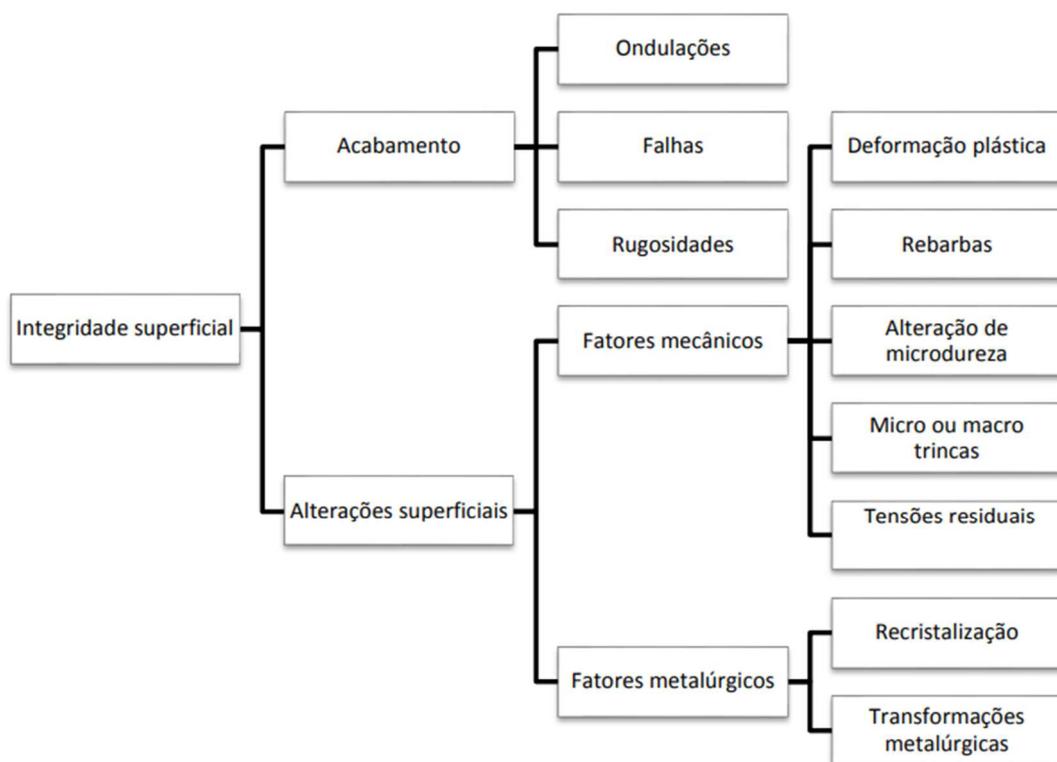


Figura 16: Classificação da integridade superficial. Adaptado de Machado et al. (2009).

2.5.1 Rugosidade

Superfícies usinadas possuem parâmetros já especificados de rugosidade de acordo com a sua aplicação. Machado et al. (2009) comenta que devido a ações resultantes do processo de usinagem, como desgastes da ferramenta, aresta postiça, marca de avanços e entre outros fatores que surge a rugosidade, que por sua vez pode ser definida como pequenos erros na escala micro ou irregularidades finas. A rugosidade é um dos parâmetros mais importantes, pois seu valor pode determinar a aplicação da superfície como em superfícies de mancais, superfícies que requerem pintura, superfícies para escoamento de fluidos e superfícies que tem a função de refletir raios e luzes (MACHADO, ABRÃO, COELHO et al. 2009).

Apesar de diversas aplicações o grande foco na rugosidade justifica-se pela sua correlação com importantes parâmetros citados por Amorim (2002), como:

- **Precisão e tolerância:** afetando diretamente nos desgastes de superfícies, com o seu aumento à medida que cresce a rugosidade;
- **Resistência à corrosão:** superfícies com rugosidades maiores tornam-se mais propensas a corrosão, devido a maior acumulação de líquidos e vapores em si mesma;
- **Resistência à fadiga:** a área efetiva cresce com o aumento da rugosidade, levando superfície sobre cargas dinâmicas a terem maiores concentradores de tensões, levando a maiores chances de trincas;
- **Escoamento de fluidos:** baixas rugosidades em superfícies tendem em maiores velocidades ter escoamentos laminares;
- **Transmissão de calor:** a área de contato entre superfícies aumenta com baixos valores de rugosidade, por consequência o coeficiente de transmissão de calor aumenta, melhorando ainda mais a troca de calor entre corpos, pode-se observar essa relação na Figura 22;

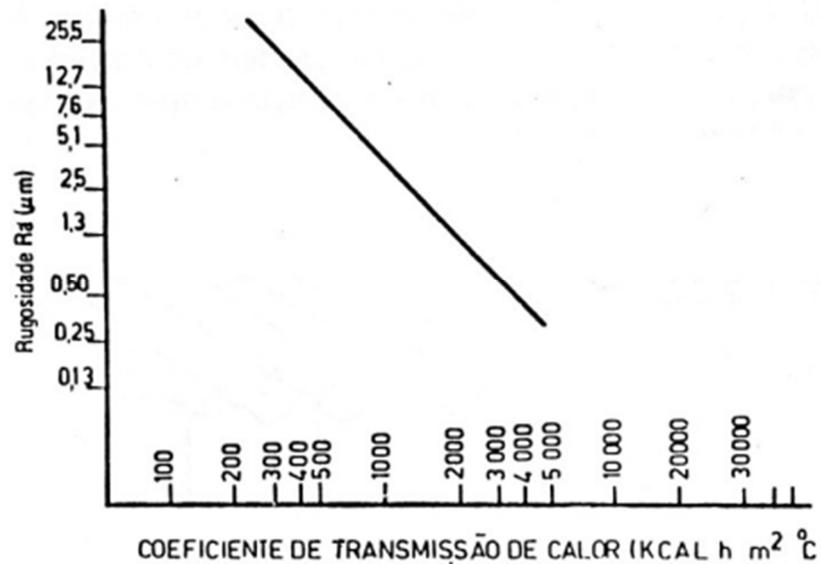


Figura 17: Relação entre a rugosidade média e o coeficiente de transmissão de calor (GONZÁLEZ, 1998).

Após o processo de usinagem a rugosidade, termo micro geométrico, é determinada. Essa determinação da rugosidade é dividida em 3 parâmetros citados por Machado et al. (2009) como:

- **Parâmetro de amplitude:** avaliada pela profundidade dos vales e altura dos picos que determinam a amplitude final. Na figura é representado os vales e picos;
- **Parâmetro de espaço:** avaliada ao longo da superfície na verificação do espaçamento do desvio do perfil. Na figura 23 é representado o espaçamento de perfil;
- **Parâmetro híbridos:** avaliada na combinação dos parâmetros de espaço e amplitude.

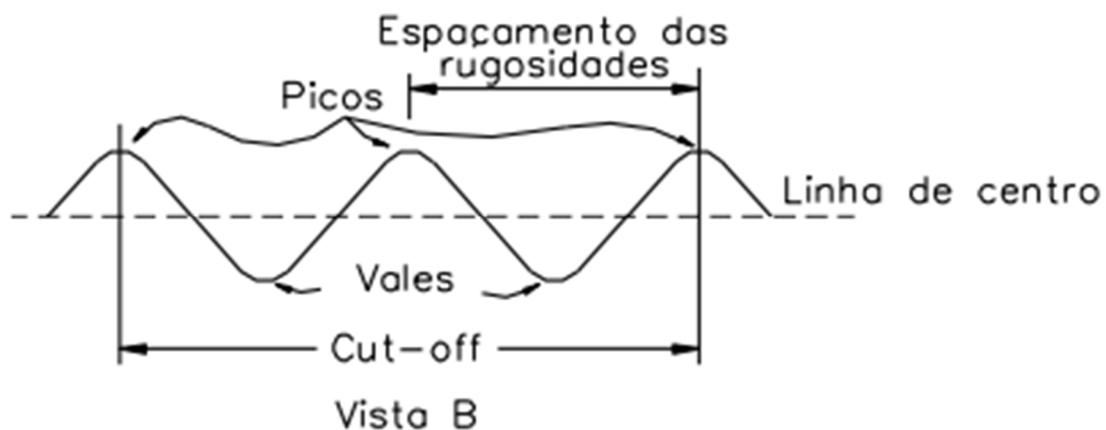


Figura 18: Representação de picos, vales e espaçamentos de perfis (JUNEJA, SWKHON, 1987).

2.6 Fresamento

O fresamento é um processo que ocorre em uma máquina chamada fresadora, este tipo de operação faz parte do grupo de processos convencionais de usinagem. Sua característica é que a remoção de material ocorre através do movimento da fresa, com múltiplas arestas cortantes. A cada revolução feita pela aresta da ferramenta, resulta na remoção de uma pequena camada de material, chamada cavaco. Além dessa principal característica, Diniz et al. (2010) debatem sobre duas outras: como a proporção da rotação da ferramenta com o movimento de corte e que o movimento e avanço é geralmente feito pela própria peça em usinagem, que está presa à máquina, por fim, sendo obrigada a ir de encontro com a ferramenta em movimento. A Figura 24 mostra algumas representações de fresamento.

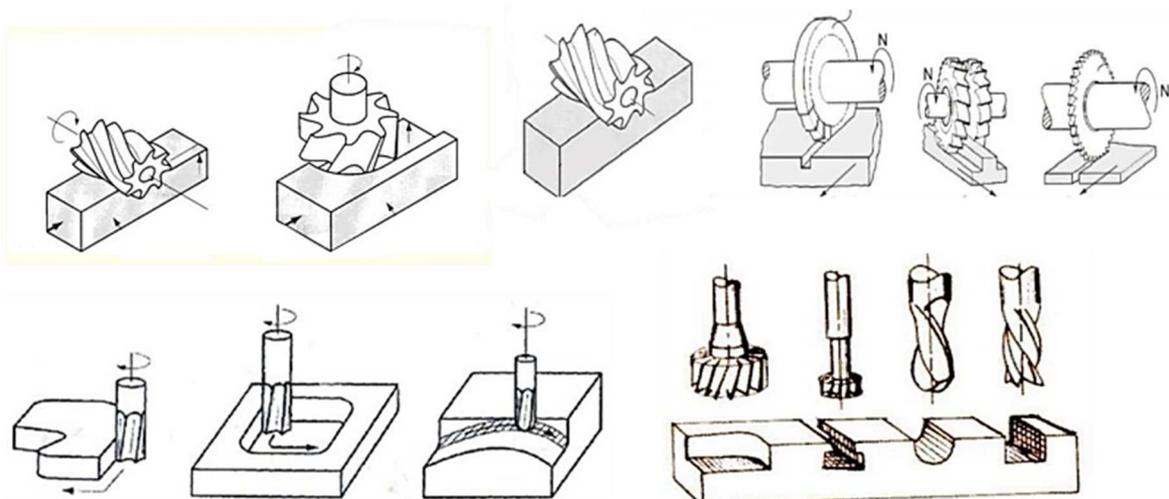


Figura 19: Exemplo de operações típicas de fresamento (COELHO, DA SILVA, 2018).

A possibilidade de usar a fresadora de diversas formas, torna o fresamento um processo de grande versatilidade, olhando para mais diversas superfícies necessárias para uma peça usinada. Essa versatilidade se mostra quando o fresamento pode formar superfícies como as de furação, alargamento, aplainamento, brochamento e retificação (FERRARESI, PALLEROSI, RUFFINO, 1970) (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2010).

Ferraresi et al. (1970) mencionam que há 2 classificações para fresamento quando se leva a disposição dos dentes ativos na fresa, são eles:

- **Fresamento tangencial:** processo em que as fresas são definidas como fresas cilíndricas ou tangenciais. Procedimento em que na superfície cilíndrica da ferramenta se localizam os dentes ativos, assim a superfície gerada é sempre paralela ao eixo (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2010);
- **Fresamento frontal:** operação que as fresas são chamadas de fresas frontais ou de topo. Neste fresamento os dentes ativos se localizam na parte frontal da superfície da ferramenta, resultando uma superfície gerada perpendicular à fresa (FERRARESI, PALLEROSI, RUFFINO, 1970).

2.6.1 Fresamento de topo

O fresamento de topo ocorre tanto paralelamente como perpendicularmente a rotação da fresa, ou seja, neste tipo de processo a aresta da ferramenta de corte fica de forma tangencial como frontal a fresa. O fresamento de topo apresenta ser um método muito sensível quando comparado aos outros processos, quanto algumas variáveis das ferramentas como número de estrias, ângulo e hélice e material. Com isso, as ferramentas mais comuns para este processo são as ferramentas esféricas (*ball end cutters*), as de ranhuras em T (*t-slot cutters*) e as de canto vivo (*square end cutters*) (SILVA, 2010). Na Figura 25 observa-se exemplos de ferramentas usadas no processo de fresamento.

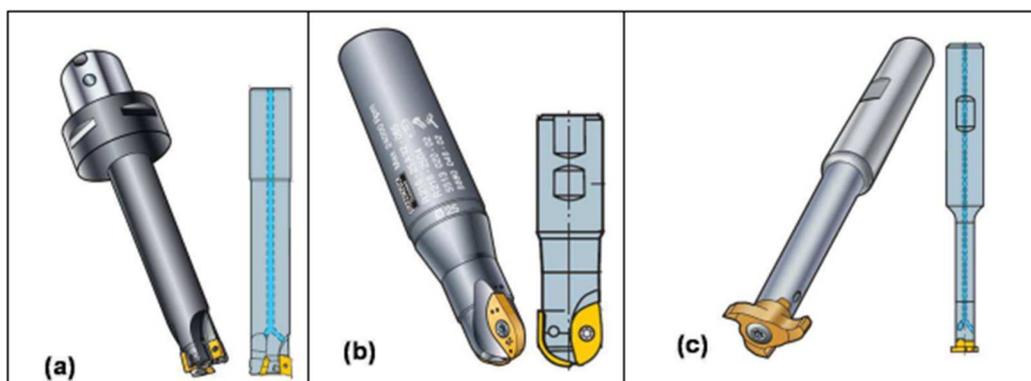


Figura 20:Exemplos de ferramentas usadas no fresamento de topo: a) de canto vivo; b) esférica; e ranhuras em T (COROMANT, 2009).

Apesar do fresamento de topo ser um excelente processo para se obter bons acabamentos superficiais, existe um principal problema envolvendo a ferramenta, pois as ferramentas apresentam rigidez muito pequena quando se comparada ao fresamento frontal, isso se deve a

uma característica de que neste tipo de processo a ferramenta apresenta um grande comprimento em relação ao seu diâmetro, deixando a ferramenta em balanço. Esse problema é crucial, pois devido a ele a remoção de cavaco possuiu taxas pequenas, a deflexão do eixo, causa problemas tanto na ferramenta, máquina e superfície usinada como ilustrado na Figura 26 (SILVA, 2010).

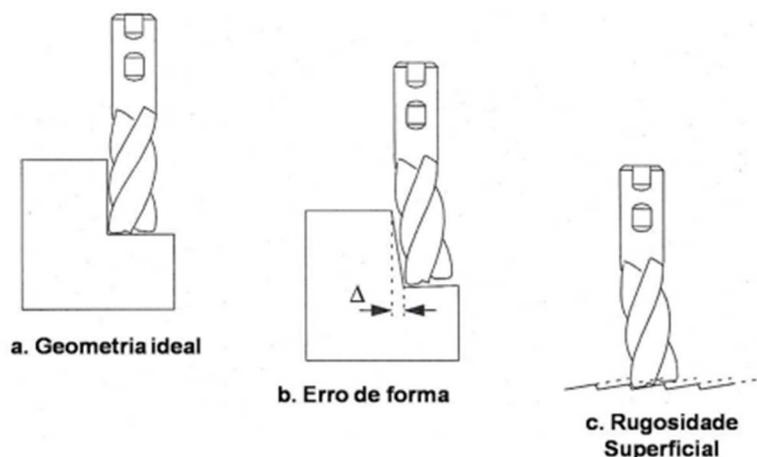


Figura 21: Problemas devido a deflexão do eixo da ferramenta. Adaptado (TRENT, 1985).

Esta deflexão da ferramenta de corte gera grandes erros dimensionais na superfície da peça acabada. Alguns experimentos concluíram que a fresa quase sempre se reflete para fora da peça, quando se trata de fresamento concordante, resultando em dimensões maiores que a desejada. Agora, para fresamento discordantes observa-se o contrário (KLINE, DEVOR. SHAREEF, 1982).

2.6.2 Forças de corte no fresamento

Para garantir usinagens com melhores valores econômicos e mais eficientes no ponto de vista energético é necessário que se conheça a usinabilidade dos materiais, entretanto para um bom estudo dessa particularidade, mostra-se necessário o conhecimento dos esforços de corte envolvidos no processo de fresamento (BANIN JÚNIOR, 2009). Esses esforços são influenciados por diversos fatores como: taxa de encruamento, dureza, elementos de liga do material usinado e a resistência ao cisalhamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001). É necessário projetar os vetores de forças em um plano ortogonal no processo de fresamento para assim se determinar as direções, pois durante o processo não é possível conhecer-se a direção

e sentido da força de usinagem. Assim projetamos as componentes F_c , F_r , e F_{ax} , ou F_x , F_y , e F_z , como pode-se observar na Figura 27 (KÖNIG, KLOCKE, 1999).

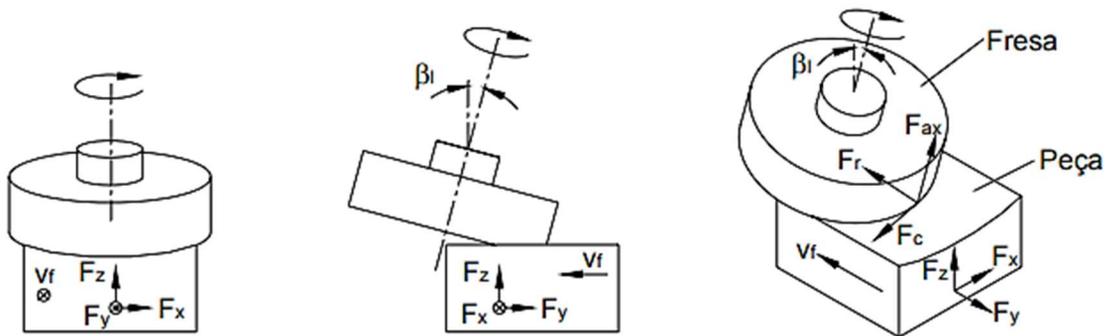


Figura 22: Componentes da força de usinagem segundo os sistemas de coordenadas na ferramenta e na peça (CAMACHO, 1991).

Cada dente da fresa, quando está dentro da área de corte, recebe uma carga de impacto durante o fresamento. E essa carga é influenciada por diversos fatores como material da peça, posição da ferramenta, parâmetros do fresamento e geometria da ferramenta. O comportamento da força de fresamento é cíclica e bem proporcional à espessura do corte. A Figura 24 traz como o número de dentes influencia a força na direção y (KÖNIG, KLOCKE, 1999; WECK, 1996).

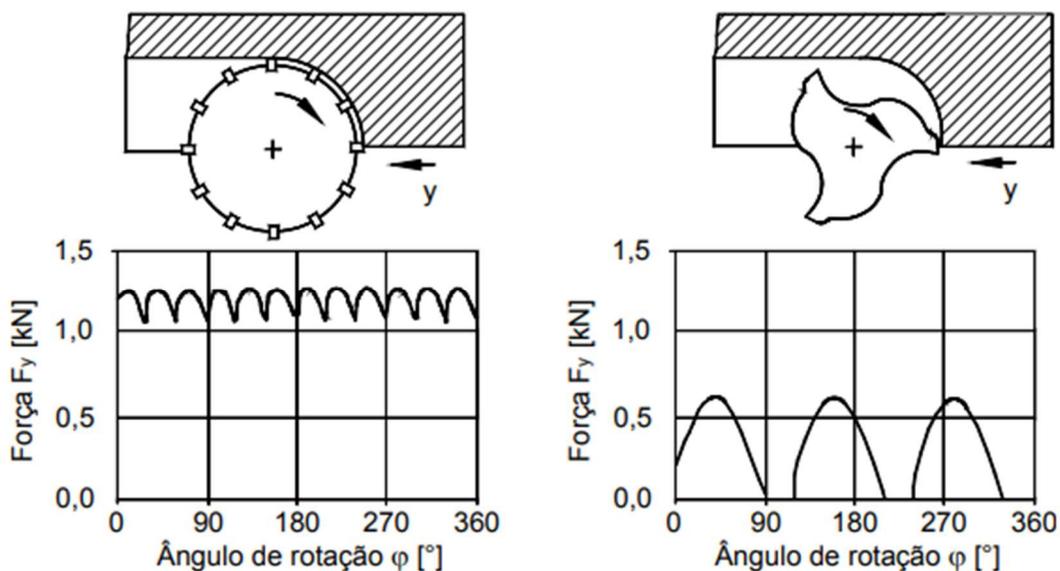


Figura 23: Comportamento da força F_y para diferentes números de dentes (WECK, 1996).

Outro parâmetro importante é a velocidade de corte, o seu aumento leva a uma maior energia na zona de deformação do material. Além de levar as maiores taxas de deformação plástica,

com menores quantidades de calor dissipado na região plasticamente deformada, levando a diminuição da força de corte (BOOGERT, 1996; KOEPFER,1997).

2.6.3 Rugosidade de peças fresadas

Pode-se observar na Tabela 1, de acordo com a Norma ABNT NBR4287(2002), os parâmetros empregados na quantificação da rugosidade, seu nome e suas definições, como os R_a (Desvio aritmético médio), R_t (altura total do perfil) e R_q (Desvio médio quadrático) entre outros.

Tabela 1: Principais parâmetros de rugosidade. Adaptado de Machado et al. (2009).

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior de profundidade vale do perfil no comprimento de avaliação
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil (skeumess)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{kd}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

Segundo Machado et al. (2009), as equações 6 e 7 que determinam a rugosidade teórica para a operação de fresamento frontal são:

$$R_a = \frac{r_e - \sqrt{r_e^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (6)$$

$$R_t = \frac{f_z}{\tan C + \cot D} \quad (7)$$

O f_z é o avanço por dente e r_e é raio de ponta da ferramenta. Pode-se observar na Figura 29 um perfil teórico de superfície usinada por fresamento frontal, com os respectivos símbolos sendo ilustrado. Os valores teóricos da rugosidade ficam sempre menores que os valores verdadeiros, isso se dá, a não consideração de fatores diversos como desgastes irregulares na ferramenta, vibrações, fluxo não uniforme de cavacos saindo e condições da máquina-ferramenta (MACHADO et al., 2009; SOUZA, 2011).

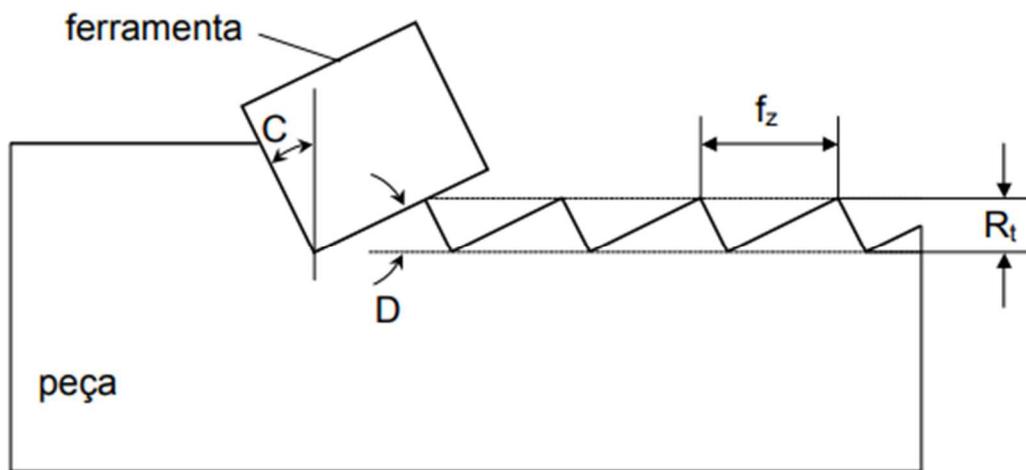


Figura 24: Perfil teórico de superfície usinada por fresamento frontal (MACHADO, ABRÃO, COELHO et al. 2009).

Em pesquisas feitas sobre o estudo da interação da velocidade de corte e avanço nos aspectos da rugosidade, Yasir et al. (2016) fizeram um experimento com o material de aço inoxidável AISI 316L. Neste experimento se variou as velocidades de corte de 80, 100 e 120 m/min, de forma com que cada avanço com valores de 0,10;0,12 e 0,14 mm/rev fossem investigados com as velocidades. Os autores chegaram à conclusão que o avanço é bem mais expressivo do que a velocidade de corte no quesito de efeitos da qualidade superficial, na qual foi encontrado que taxas de avanço mais altas levam a superfícies ásperas e com muitas presenças de marcas de alimentação interrompida, que são irregularidades ou imperfeições, causada pela interrupção no movimento da fresa, o que difere de avanços com valores mais baixos que apresentaram superfícies mais lisas.

Pode-se afirmar de forma mais clara quando olha-se para os resultados encontrados na Figura 30, no qual mostra-se que quando aumenta-se a velocidade de corte a rugosidade tende-

se a diminuir, isso decorre pois tem-se uma diminuição da aresta postiça de formação. Já quando se olha em relação aos efeitos do avanço percebe-se que quando ele é aumentado o valor de Ra começa a aumentar significativamente, Huang et al. (2007) e Kumar et al. (2015) afirmam que isso é causado à medida que a taxa de avanço aumenta, deste modo, produzindo forças de impulso que agem na superfície e também geram vibrações, levando a um aumento da rugosidade superficial. As conclusões encontradas pelos autores fornecem resultados valiosos para entender a influências dos parâmetros de fresamento no acabamento superficial da peça.

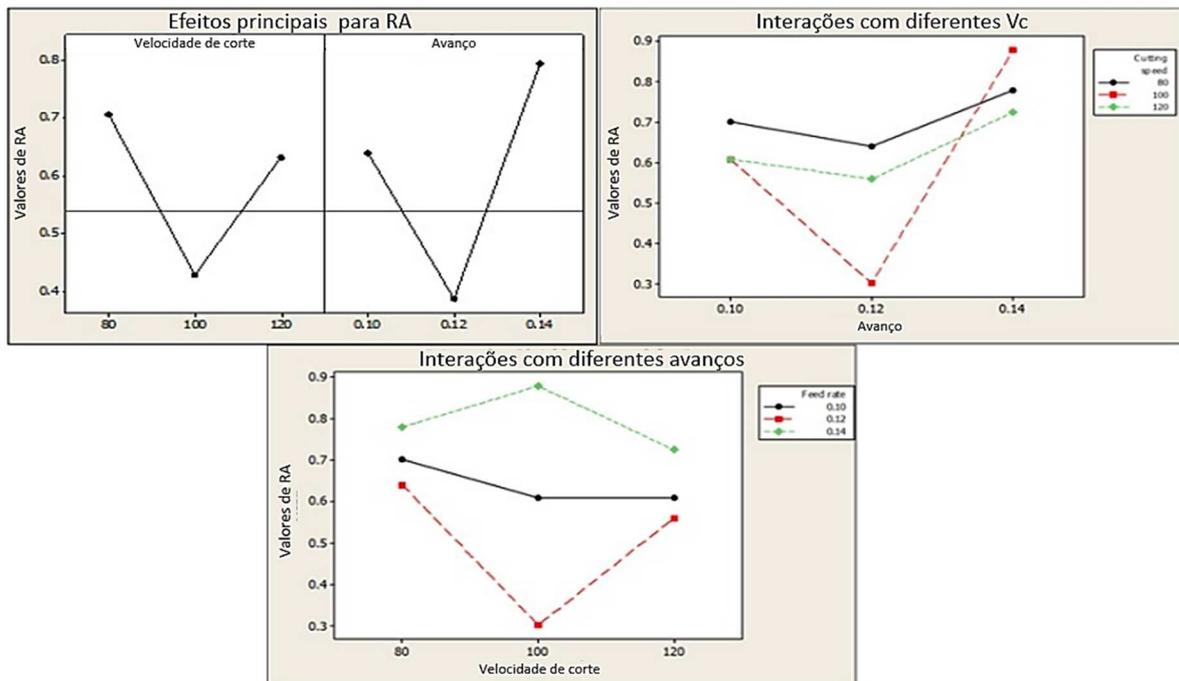


Figura 25: Interação do avanço e velocidade de corte nos valores da rugosidade. Adaptado de Yasir (2016).

Em uma análise microscópica é possível ver as diferenças do acabamento superficial de suas superfícies com a mesma velocidade de corte ($v_c=100$ m/min) e avanços de 0,12 e 0,14 mm/rev. Imagem dos testes sendo apresentados na Figura 31. Esses testes foram considerados pelos autores as melhores e piores condições para se fazer uma observação. O teste com menor avanço apresentou uma superfície lisa, contínua e suave. Já para o teste com o maior avanço obteve-se uma superfície com várias marcas de alimentação, com interrupções e com visíveis cristas e vales.

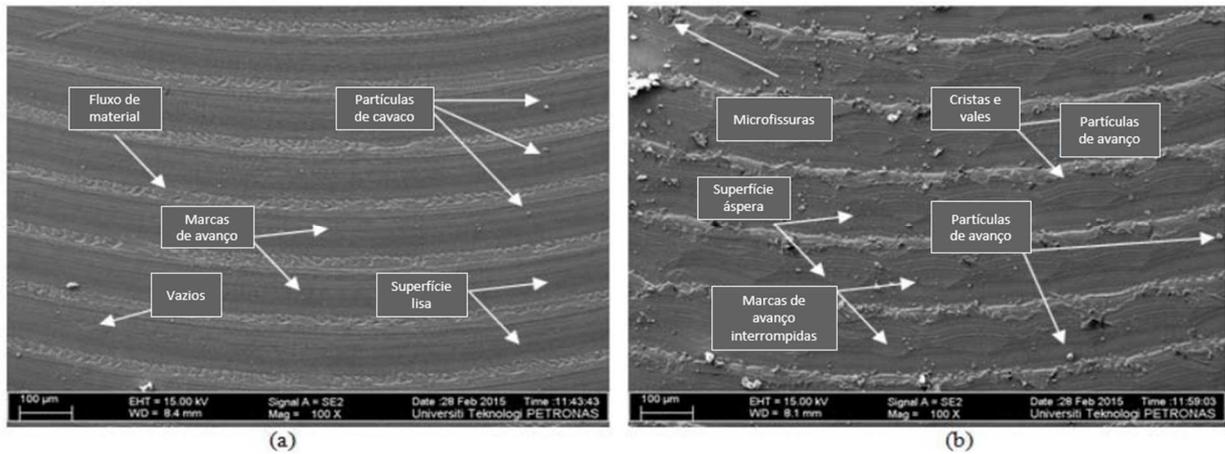


Figura 26: Micrografia dos testes com velocidade de corte de $V=100\text{m/min}$ a) 0.12mm/rev b) 0.14mm/ver , adaptado de Yasir (2016).

O autor Trung (2020) realizou teste com amostras feitas de aço AISI 1045. Vários testes com diferentes velocidades de corte (na faixa de 140; 200 e 260 m/min), avanços (na faixa de 0,1; 0,2 e 0,3 mm/dente) e profundidade de corte (na faixa de 0,28; 0,40 e 0,52 mm). Como resultados, o autor Trung (2020) confirma a mesma conclusão encontrada por Yasir et al. (2016), afirmando que dentre os três principais parâmetros, velocidade, avanço e a profundidade, o avanço é que traz os resultados mais significativos para os valores da rugosidade média, isso mostrou que variar a velocidade de corte e profundidade não possuem grandes impactos nos valores de rugosidade média. Os resultados encontrados pelo autor são vistos nas imagens da Figura 32.

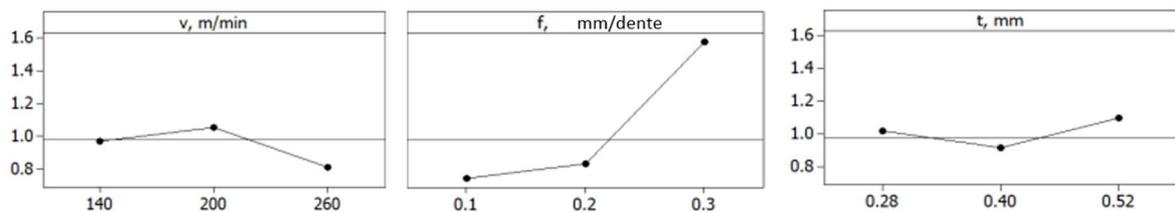


Figura 27: Interação da velocidade de corte, avanço e profundidade no valores da rugosidade, adaptado de Trung (2020).

2.7 Manufatura Aditiva de Metal

A competitividade do mercado obriga os fabricantes a produzirem cada vez mais com uma maior qualidade, isso modificou a forma de fabricar produtos, pois as empresas estão sempre buscando uma produção mais rápida e com menor custo de produção, entretanto sempre mantendo sua qualidade. Para se adaptar a todas essas mudanças, a chamada Manufatura Aditiva se enquadrou perfeitamente, uma vez que trouxe soluções para os requisitos de economia de matéria prima, tempo de produção e qualidade (KOVALENKO, 2019). Do mesmo modo, a MA traz uma maior liberdade para produção de design de peças, que potencialmente resulta em uma diminuição de peso, bem como a diminuição de etapas para produção de produtos complexos (COTTELEER, JOYCE, 2014).

Os grupos de tecnologia que usam uma abordagem por camada com o objetivo de criação de objetos, com forma livre, é definido como “Manufatura Aditiva”, do inglês *Additive Manufacturing- AM*. No qual determinam-se os movimentos e trajetórias da deposição através de um modelo CAD 3D convertido em camadas (GIBSON et al, 2010). É possível averiguar esses passos na Figura 33 em que o modelo 3D foi convertido em camadas para em seguida ocorrer a deposição.

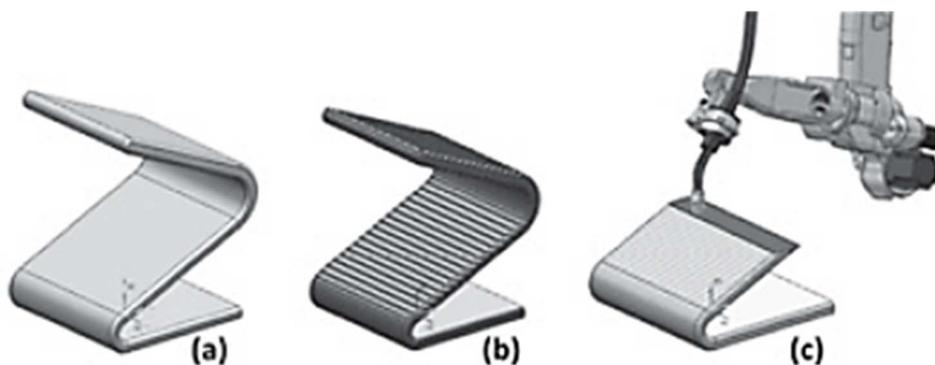


Figura 28: Esquema da MA: a) Modelo CAD 3D; b) Divisão por camadas; c) Deposição das camadas (ALBERTI, SILVA, D'OLIVEIRA, 2014).

Em termos econômicos, vê-se uma grande vantagem na produção por MA, principalmente quando se trabalha com “customização em massa” ou produção em pequenos lotes (CAMPBELL et al., 2018). Por isso, no decorrer dos últimos anos há uma grande luta com a

finalidade de difundir a produção de objetos por MA, bons exemplos são nas indústrias aeroespaciais, no qual Zocca (2022) comenta que com a ideia de exploração de Marte e da Lua a fabricação de objetos no espaço se torna uma necessidade. Ou no ramo ferroviário que a MA vai poder fazer peças sobre medidas para reposição de trens com uma abordagem mais rápida e flexível, diminuindo assim grandes perdas financeiras (MUVUNZI, 2022). Por fim, no ramo automotivo, onde os autores Sarvankar et al. (2019) dizem que a MA fez “maravilhas”, conseguindo tornar possível produtos mais baratos, leves e com diferentes formas.

No caso de peças metálicas, a MA possuiu mais que 18 métodos de fabricação, contudo se tornam economicamente inviáveis várias delas, devido à falta de tecnologia disponível no mercado (AMPOWER, 2019) (THOMAS-SEALE et al., 2018). A norma ABNT NBR ISO/ASTM 52900 (ISO, 2018) restringe a impressão para metais e ligas a 4 métodos como *Binder Jetting*, *Direct Energy Deposition*, *Power Bed Fusion* e *Sheet Lamination*. Entretanto, para fabricação de peças metálicas, 3 tipos de técnicas se destacam (TOYSERKANI et al., 2022), são elas:

- Fusão em leito de pó (FLP) (*Power Bed Fusion*);
- Jato de ligante (JL) (*Binder Jetting*);
- Deposição com energia direcionada (DED) (*Direct Energy Deposition*).

Existem vários trabalhos que citam as técnicas de FLP e JL, um exemplo de estudo que cita essas técnicas são os publicados por Mergulhão (2022), Frazier (2014), Herzog (2016), entre outros, entretanto este trabalho vai ter um foco na técnica de deposição com energia direcionada.

A técnica DED consiste em lançar uma fonte de energia térmica concentrada com o intuito de fundir o material de adição na forma de arame ou pó na peça pré-existente, como mostrado na Figura 34. A norma ABNT NBR ISO/ASTM 52900 (ISO, 2018) define o método DED como o processo no qual por meio de energia térmica se faz a fusão à medida que os materiais são depositados. Os processos DED são comumente utilizados na fabricação de componentes de forma não tão complexas e grandes (DEBROY et al., 2018).

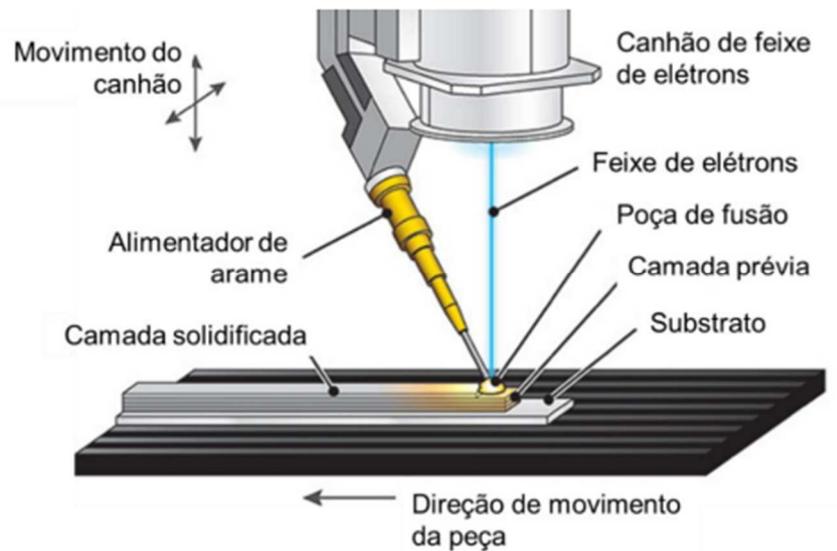


Figura 29: Representação esquemática de um processo DED com feixe de elétrons e arame. Adaptado (SCIAKY, 2021).

Os processos DED são classificados por duas formas, considerando matéria-prima e tipo de fonte de energia. Alguns exemplos de fonte de energia são laser, feixe de elétrons, plasma e arco a plasma. A divisão em matéria prima se subdivide em DED a base de pó e a base de arame (DASS; MORIDI, 2019), todas essas subdivisões podem ser vistas na Figura 30.

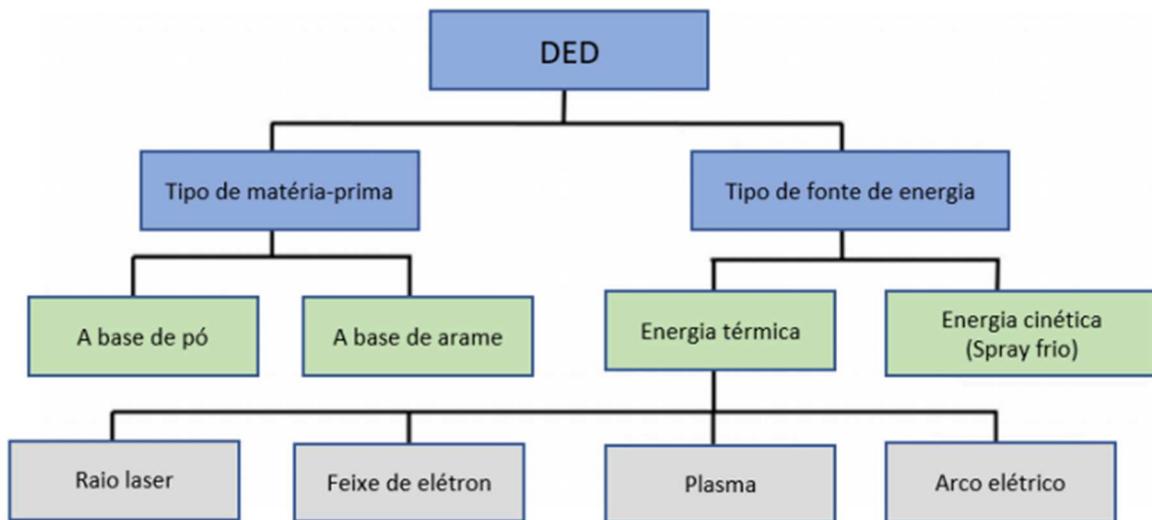


Figura 30: Sistemas de classificação do processo de Deposição de Energia Direta (DASS; MORIDI, 2019).

Dentre diversos métodos DED, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) tem um grande destaque, devido a uma fácil implementação e um custo econômico baixo (JAFARI et al., 2021).

2.7.1 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, um método que consiste em um arco como fonte de calor que promove a fusão de um fio, é uma técnica que consiste em gotículas com uma taxa de deposição rápida. O método MADA é bastante vantajoso em termos econômicos, apresentando o custo da sua matéria prima, o fio, um valor de 10% o custo de pó, além de usar a máquina de soldagem convencional, o que torna o método mais barato do que em relação aos métodos de feixes de elétrons ou laser. Outra grande vantagem apresentada por esse método é sua capacidade de gerar menos poros do que em comparação aos métodos a base de pó, tornando os produtos feitos por MADA com maiores qualidades (LEE, 2020). Zeli et al. (2021) comentam que a MADA pode reduzir o tempo de fabricação de 40-60% e o tempo de pós-usinagem em até 15 – 20%.

Devido à capacidade de altas taxas de deposição na MADA, com números acima de 130 g/m, do que os processos a feixe de elétrons, com 10 g/min, e a laser, 2 g/m, a manufatura aditiva por deposição a arco é comumente utilizada em produção de grandes peças (DEBROY et al., 2018; SURYAKUMAR et al., 2011). Zeli (2011) discute sobre alguns tipos de processos MADA muito utilizados nas indústrias, são eles o MAG (GMAW - *Gas Metal Arc Welding*), TIG (GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*) e o CMT (*Cold Metal Transfer*) (ZELI,2021). Como o foco desse trabalho é uma peça feita por CMT, vamos debater mais sobre peças feitas por este método.

O CMT é um processo de otimização dos processos MIG/MAG, foi criado pela empresa austríaca Fronius Internacional em 1991 (POLAK; DOSTAL, 2013). Baseado no modo curto-circuito, o processo CMT tem o seguinte modo de funcionamento, forma-se uma gota de metal, na ponta do arame-eletrodo, quando o arco é aberto. Tem-se uma diminuição da corrente e tensão quando a gota está no final da sua formação, com isso o arame começa a ir em direção a poça de fusão, resultando em uma diminuição do arco. No momento em que a gota metálica encosta na poça, começa-se o curto-circuito, à medida que a corrente aumenta e a tensão se aproxima do zero. A tensão começa a crescer no final do curto-circuito, enquanto a fonte muda de direção o arame-eletrodo e o afasta da poça de fusão. Neste instante o menisco metálico rompe-se e reacende a corrente e o arco (KOVALENKO, 2019). Todo esse processo é visualizado na Figura 36.

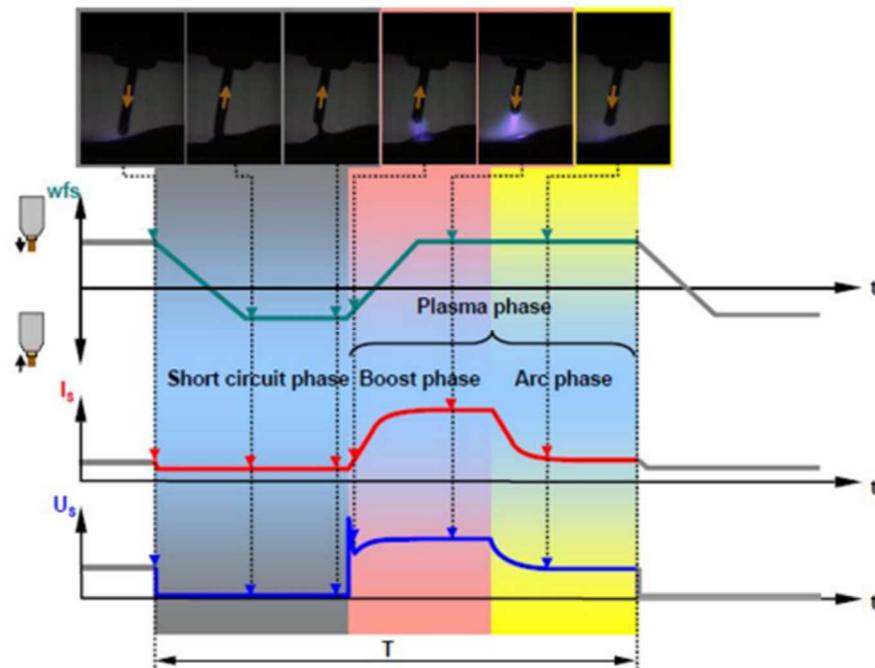


Figura 31: Curvas esquemáticas características idealizadas de velocidade de alimentação, corrente e tensão e suas fases respectivas do modo operacional CMT (KAZMAIER; ARTELSMAIR, 2007).

2.7.2 Microestruturas de Materiais Impressos por CMT

A autora Oliveira (2022) analisou a microestrutura de peças impressas de arame ER70S-6 obtidas via processo CMT. Neste experimento foi feita uma deposição com passo fixo de 1,2 mm, corrente de 131 A, tensão de 20,15 V, velocidade de alimentação de 5,2 m/min, velocidade de deslocamento da tocha de 12 mm/s e deposição bidirecional/contínuo. Como resultados na análise metalográfica foram observadas microestruturas escurecidas, com presenças de poros na região superior das peças e sem a presença de grãos evidentes de tamanho de 10,74. Foi percebido a presença de grãos refinados de perlita nas regiões mais escuras e grãos de ferrita nas regiões mais claras. Para a região inferior, há grãos de tamanhos de 11,4 e uma grande presença de perlita na estrutura similar a laminar. É possível visualizar essas observações na Figura 37.



Figura 32: Microestrutura da primeira amostra com lente 50x (OLIVEIRA,2022).

Quando analisado outra amostra, produzida com os seguintes parâmetros de peso fixo 1 mm, corrente 110 A, tensão de 21,4 V, velocidade de alimentação de 4,2m/min, velocidade de deslocamento de 12 mm/s. Foram observadas algumas diferenças da primeira amostra, Claudino (2022) comenta que esta segunda amostra possuiu muitos defeitos como poros maiores e inclusões. A análise metalográfica da Figura 38 teve resultados como a identificação da presença de poros numa região determinada próxima a uma região superior, ainda nesta região foi identificada grãos de tamanho de 10,9. Já na região próxima à região inferior foi identificado grãos de tamanho de 11,26 (OLIVEIRA,2022).

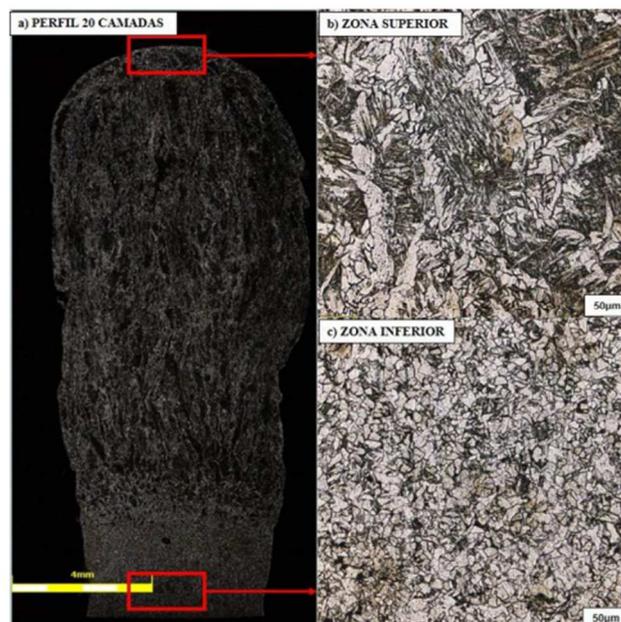


Figura 33: Microestrutura da segunda amostra com lente 50x (OLIVEIRA,2022).

Das et al. (2022) também trabalharam com arame ER70S-6 depositado por CMTeles fizeram um cordão de solda com os seguintes parâmetros para o experimento, gás de proteção sendo o argônio, taxa de fluxo do gás de proteção e 20 l/min, corrente elétrica de 100 A constante, velocidade de soldagem 400 mm/min, velocidade de alimentação de 10/min e velocidade de tocha de 8 mm/s. Neste experimento os autores fizeram uma análise microscopia de peça.

É possível ver na Figura 39 uma foto microscopia da peça feita pelos autores Das et al. (2022), mostrou-se que o processo CMT com ER70S-6 não apresenta porosidades significantes nas micrografias, apresentando uma das qualidades deste tipo de processo. Nesta peça foi apresentada uma grande estrutura dendrítica na parte central do cordão de solda, devido a um grande gradiente de temperatura na parte central, longa das bordas. O autor ainda comenta que esta estrutura obtida é comumente encontrada em fabricações com processos CMT (DAS et al.2022).

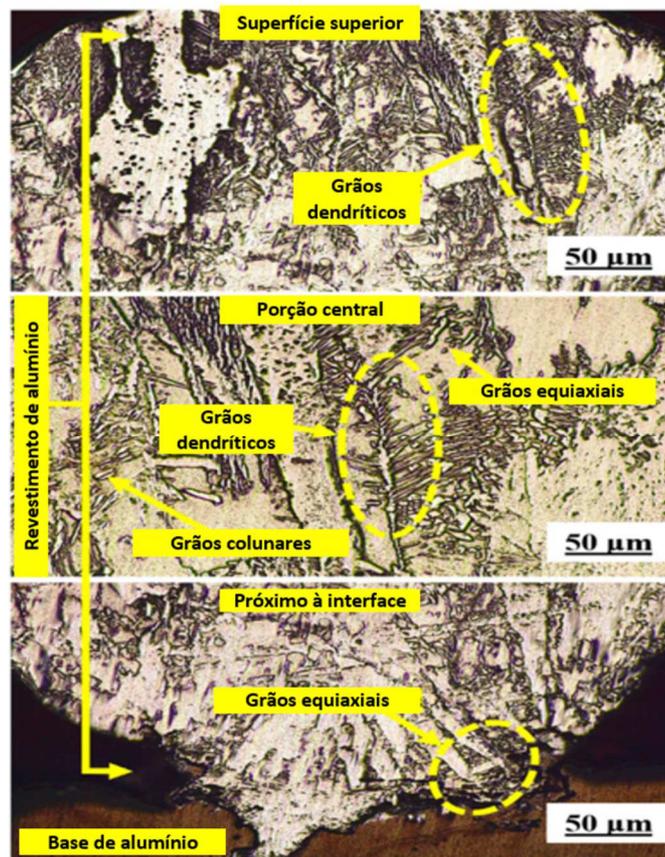


Figura 34: Microestrutura da amostra com lente 20x. Adaptado de Das, Panda e Dixit (2022).

2.8 Fresamento de Materiais Impressos por CMT

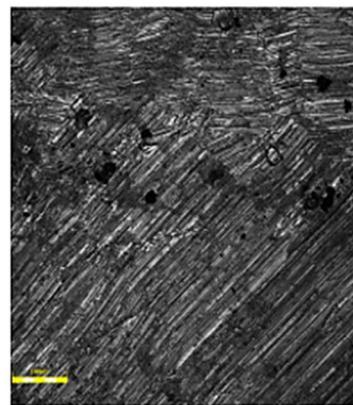
A autora Barreto (2022) se propôs ao desafio de usinar uma peça de ER70S-6, no objetivo de encontrar os melhores parâmetros para obter um bom acabamento superficial, na direção perpendicular da aplicação do material.

A autora optou por um fresamento com os seguintes parâmetros: velocidade de corte constante com valor de 15,7 m/min, profundidade de corte de 0,25 mm e variou o avanço, para cada canal, em cinco faixas que são 0,005; 0,007; 0,010; 0,014 e 0,020 mm/dente. Além de ter fresado os canais em movimentos discordantes e concordantes.

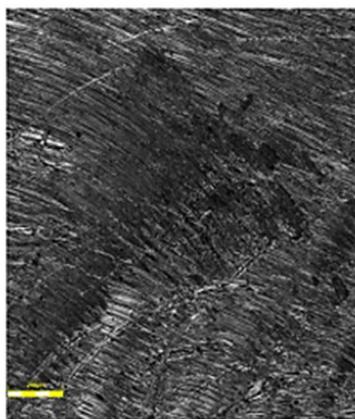
O primeiro e quarto canal, em que foi utilizado um avanço de 0,005 mm/dente e 0,014 mm/dentes, apresentou uma presença significativa de poros para os movimentos concordantes e discordantes da fresa, como apresentado na Figura 40. É possível ver um defeito visível no movimento concordante do canal 4, devido a um arrancamento de material que provavelmente foi provocado pela fresa.



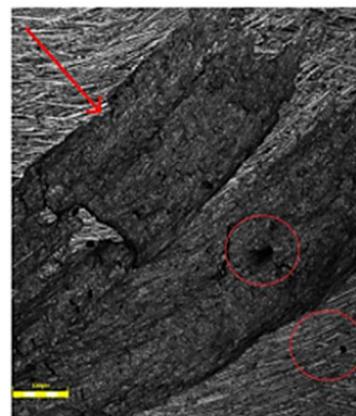
(a) Parte do canal 1, formado por movimentos discordantes, com poros visíveis.



(b) Parte do canal 1, formado por movimentos concordantes, com poros visíveis.



(a) Parte do canal 4, formado por movimentos discordantes.



(b) Parte do canal 4, formado por movimentos concordantes, com defeitos visíveis.

Figura 35: Análise de acabamento de superfície canal 1 e 4, adaptado de Barreto (2022).

Outro ponto importante que foi encontrado pela autora, foi que os canais 1 e 4 obtiveram os maiores valores de rugosidades R_a , R_z e R_q , em que é possível visualizar os gráficos de valores na Figura 41. A autora considerou que isso ocorreu devia a condições não estáveis de corte.

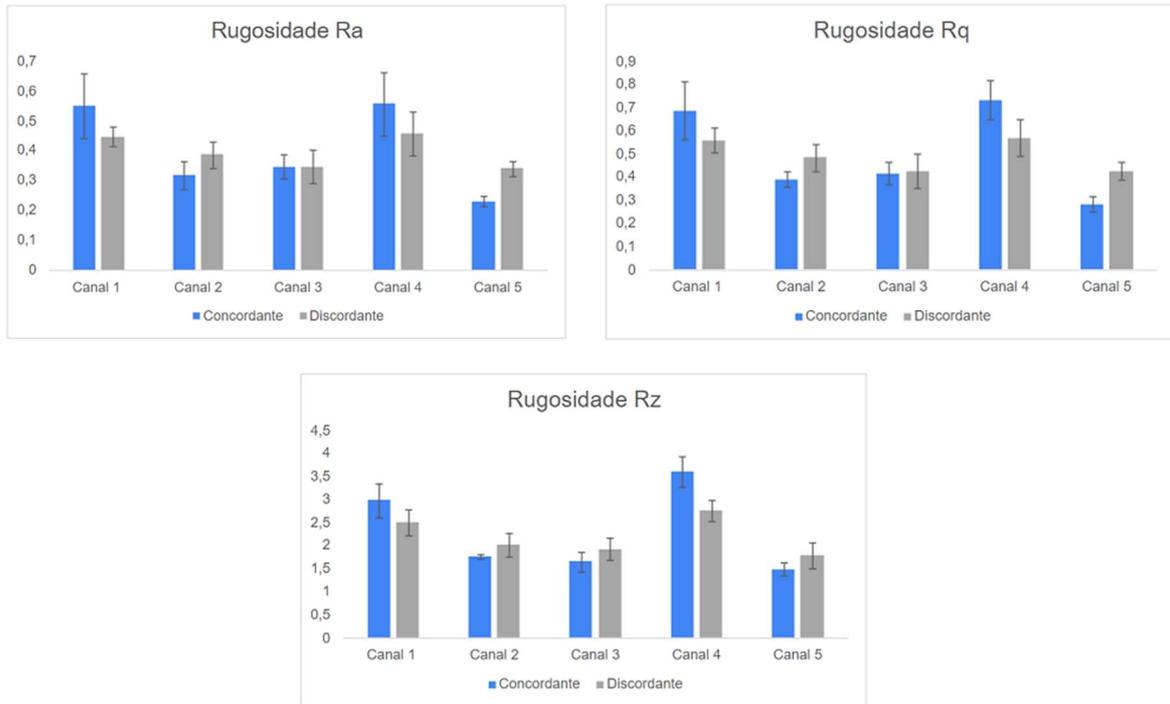


Figura 36: Relação entre os cinco canais e as rugosidades R_a , R_q e R_z (BARRETO, 2022).

Um dos debates propostos pela autora foi o motivo de porque todos os canais obtiveram a presenças de poros, várias possíveis causas foram dadas como poros irregulares, que tem como a causa a falta de fusão e alimentação do material, poros esféricos, causados pelo aprisionamento de gases e a evaporação do material ou podem se poros vazios, causados durante o fresamento.

Como um dos resultados foi comentado que para avanços maiores, foi diagnosticado valores menores para rugosidades, o que segundo a autora, está contra o que se esperava na literatura. Logo, para um melhor fresamento desta peça a opção de maiores avanços se mostra superior no quesito de qualidade superficial.

O autor Ávila et al. (2023) fresou uma peça de arame ER70S-6, em seus testes foram feitos em 10 canais retos de 0,5 mm de profundidade, o autor fez 5 ensaios e replicou cada um deles. Os parâmetros de corte utilizados pelo autor foram os apresentados na Tabela 2, para os testes

o auto optou por uma fresa de aço rápido da Vonder HSS 5.0, o fluido de corte BIO100E. Todos os testes tiveram os seguintes valores constantes:

- Avanço por dente (f_z): 0,025 mm;
- Profundidade de corte (a_p): 0,5 mm;
- Penetração de trabalho (a_e): 5 mm;

Tabela 2: Parâmetros de corte dos ensaios. Adaptado de Ávila (2023).

Condição	Canal	V_c (m/min)	V_f (mm/min)
Ensaio	1	10	63,7
	2	20	127,4
	3	30	191,1
	4	40	254,8
	5	50	318,5
Réplica	6	10	63,7
	7	20	127,4
	8	30	191,1
	9	40	254,8
	10	50	318,5

Como resultados, Ávila (2023) afirmar ter encontrados os melhores parâmetros para os ensaios com velocidade de corte de 10 m/min, tanto para sentidos concordantes como para os discordantes. Já para os piores resultados foram apresentados no canal 4, com uma velocidade de corte de 40 m/min, pode-se notar uma presença significativa de poros e maiores arrancamentos de material. Na Figura 42 e 43 é possível ver a micrografia dos canais 1 e 4.

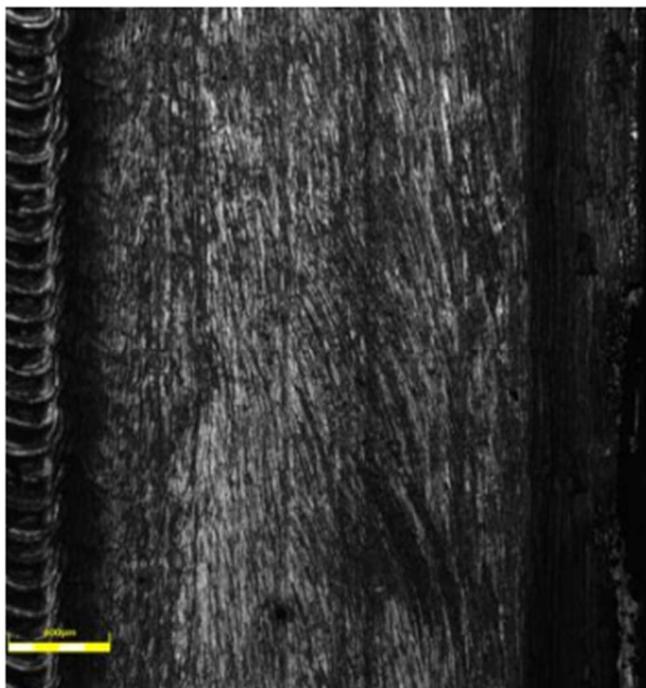


Figura 37: Micrografia do canal 1 ($V_c=10\text{m/min}$) no sentido concordante (ÁVILA et al.,2023).

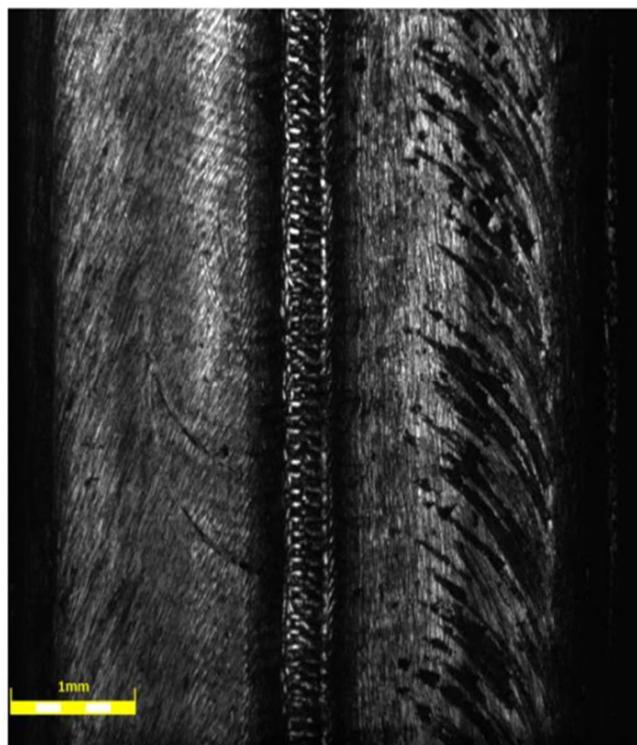


Figura 38: Micrografia do canal 4 ($V_c = 40\text{m/min}$) no sentido discordante na esquerda e concordante na direita (ÁVILA et al.,2023).

Como conclusão sobre o acabamento superficial, Ávila (2023) comenta que menores velocidades de corte proporcionam melhores acabamentos superficiais, independentemente do sentido discordante e concordante. Outra descoberta comentada pelo autor foi sobre o nível de dureza dos canais. Ele realizou o ensaio de dureza em uma amostra que não foi usinada e nos 10 canais fresados. Com isso Ávila (2023) encontrou os seguintes valores mostrados na Figura 44, em que resultou em uma dureza bem similar para todos os 10 canais e a amostra que não houve o fresamento. Com relação às diferenças de valores, o autor relata que a estrutura heterogênea do material, com uma estrutura cristalina, pode ter sido o grande influenciador. Como conclusão, o autor traz que o processo de fresamento foi pouco influente na questão dos valores de dureza do material, além de comentar que peças feitas por MADA não tem um comportamento conforme o esperado em fresamento de materiais feitos por processos convencionais.

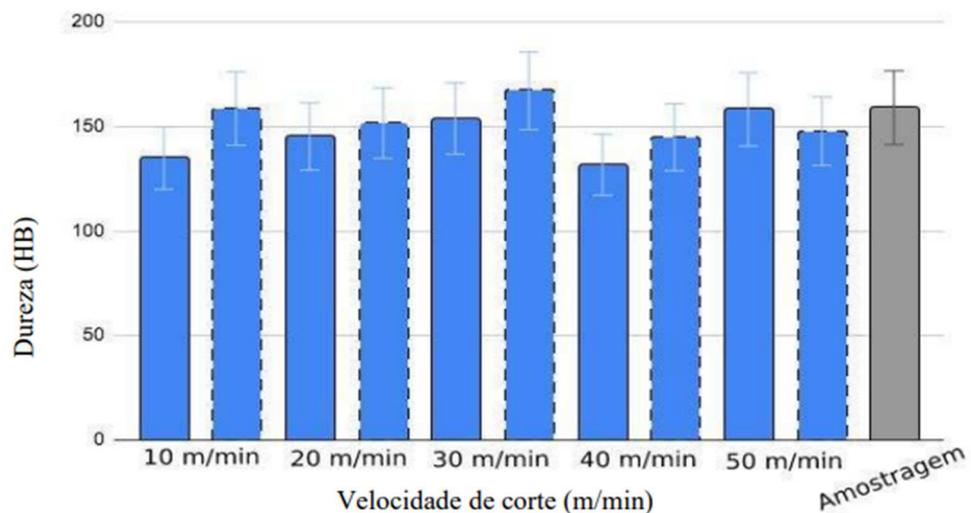


Figura 39: Comparativa da dureza entre os dez canais e a amostragem (ÁVILA et al.,2023).

Os autores Ribeiro et al. (2023) realizaram testes em uma peça feita por MADA com a deposição do arame ER70S-6, com a fresa G9A69050 de metal duro com revestimento em Nitreto de titânio Alumínio. Ribeiro et al. (2023) optaram por várias configurações de angulação de bocais. Foram feitos 4 ensaios com dois bocais com vazões de 20 l/min, mais 4 com vazões de 10 L/min, para esses casos o ângulo dos bocais variou de 45° a 15°. E por último 4 ensaios com 1 bocal com vazões de 10 e 5 L/min com um ângulo de 0°. Com o isso o autor investigou a influência do posicionamento do bocal do fluido. Para os testes o autor optou pelos seguintes parâmetros de corte:

- Velocidade de corte (v_c): 10 m/min;
- Rotação (n): 637 rpm;
- Avanço por dente (f_z): 0,025 mm/dente;
- Velocidade de avanço de (v_f): 63,7 mm/min;
- Profundidade de corte de (a_p): 0,5 mm.

Os resultados encontrados pelos autores podem ser vistos na Figura 45, nota-se a diferença das qualidades de peças dos canais com ângulos de 45°, porém vazão de fluidos diferentes. Observa-se que as superfícies com vazão de 20 l/min (Fig. 45 a) obtiveram uma qualidade superficial baixa com defeitos aparentes, enquanto a de vazão de 10 l/min (Fig. 45 b) apresentou-se poucos defeitos aparentes e com caminhos mais contínuos e homogêneos durante a superfície.

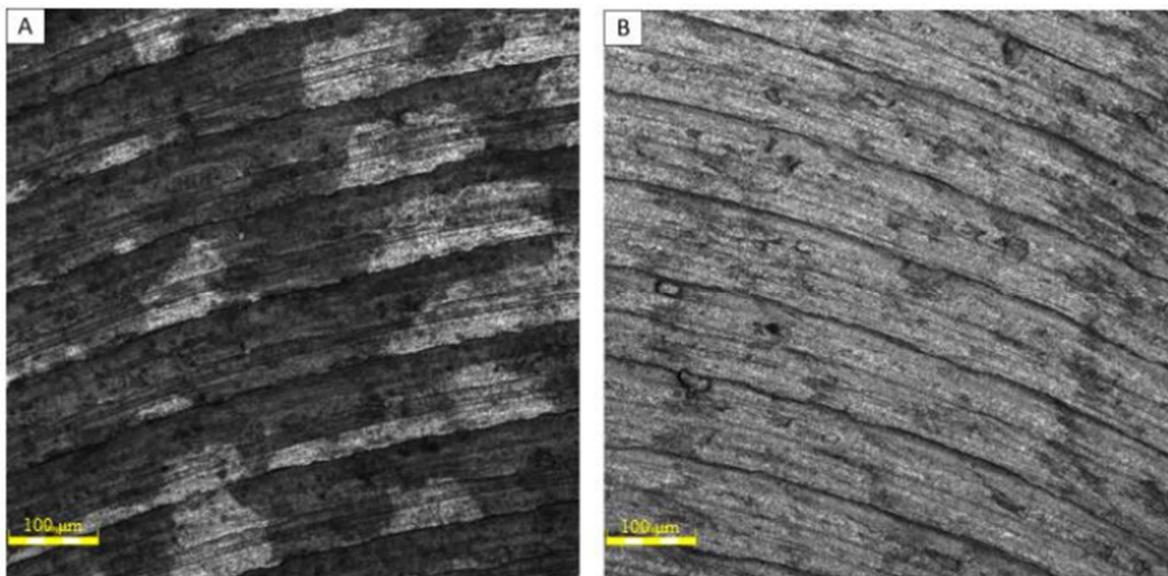


Figura 40: Imagens dos canais usinados: a) Fresado com um bocal à 45° e com vazão de 20 l/min. b) Fresado com bocal à 45° e com vazão de 10 l/min (RIBEIRO et al.2023).

Neste experimento Ribeiro et al. (2023) concluíram que as melhores qualidades superficiais são encontradas quando aplica-se uma vazão de 10 l/min, tendo como resultados valores de rugosidades menores que aproximadamente 20% quando comparado a vazões de 20 l/min.

Todos esses experimentos sevem para entender como peças feitas com arame ER70S-6 se comportam quando fresadas em diferentes métodos e parâmetros de corte. Assim, ajudando a ciência a prever e aprimorar o fresamento de topo para peças feitas deste mesmo material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o entendimento do experimento e cada passo para a realização dos ensaios com o objetivo de fazer o estudo da avaliação da influência da direção de deposição e velocidade de corte do fresamento na qualidade superficial de peças de ER70S-6 obtidas por MADA, são apresentados nos próximos tópicos deste capítulo todos os materiais e equipamentos para a realização dos experimentos, além dos parâmetros de cortes utilizados e os resultado dos ensaios.

3.1 Procedimento Experimental

Buscando a padronização dos ensaios, para obter resultados precisos e confiáveis, é fundamental seguir cada passo na ordem.

1. **Preparar a amostra:** O primeiro passo para a realização do fresamento de topo é a verificação da peça de estudo, nesta etapa é realizado uma análise macro da sua superfície como também é registrado por meio de fotografias a peça;
2. **Inspecionar a máquina:** O segundo passo consiste numa verificação nas condições da máquina onde vai ocorrer os ensaios, essa inspeção busca encontrar peças danificadas ou com mal comportamento;
3. **Limpar a superfície:** Fazer uma limpeza na superfície da máquina, principalmente na mesa, com um pano, com o objetivo de tirar gotas de óleo e cavacos;
4. **Posicionar a peça:** Nesta etapa busca-se posicionar a peça de trabalho, fixando-a na máquina;
5. **Configurar os eixos X, Y e Z:** Configurar a fresa para ficar na posição 0 do eixo X, Y e Z.
6. **Posicionar os bocais:** Posicione os bocais de fluido seguindo as posições detalhadas no tópico 3.5;
7. **Realizar do fresamento de topo:** Defina os parâmetros de fresamento para cada ensaio, detalhados no tópico 3.6 e realize todos os fresamentos do estudo, tanto nos

movimentos na direção paralela e perpendicular a direção de deposição, explicados no tópico 3.7;

8. **Analisar a superfície de forma macro:** Após o fresamento faça uma análise macro da superfície da peça, como também o registro por meio de fotos;
9. **Analisar a superfície de forma micro:** Em seguida faça a análise da superfície pelo microscópio, buscando a visualização de imperfeições, trincas e poros resultantes do processo de fresamento.
10. **Coletar os resultados:** Por fim faça a coleta dos outputs do processo como: coleta das Rugosidades R_a , R_q e R_z e da dureza para todos os ensaios deste estudo.

Todo o procedimento experimental pode ser entendido por meio do diagrama apresentado na Figura 46.

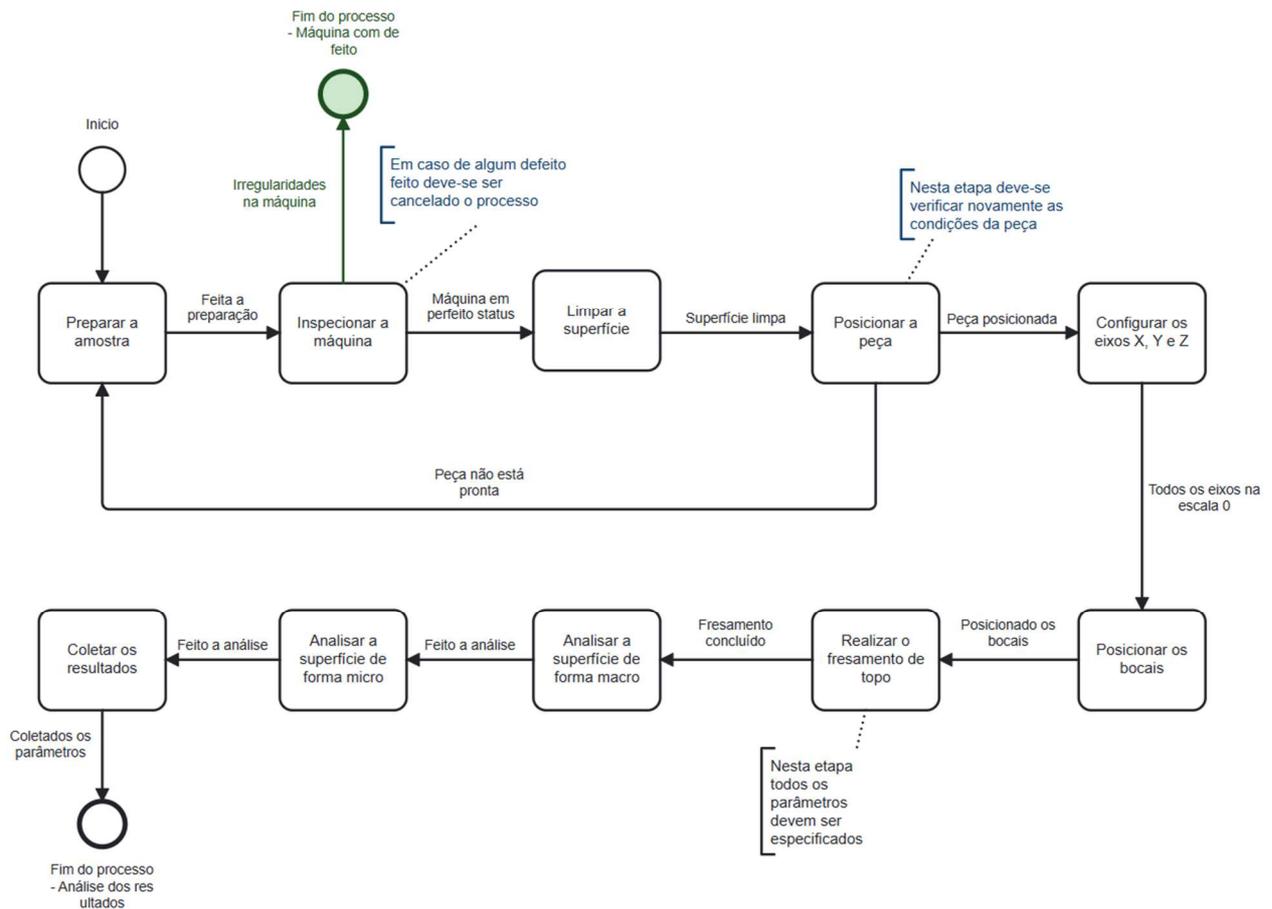


Figura 41: Diagrama BPMN das etapas para a realização do experimento

3.2 Peça Utilizada

Para o presente trabalho, utilizou-se a peça de estudo do autor Novelino (2021), onde o autor fez um estudo da geometria de cordões fabricados por manufatura aditiva por deposição a arco via processo CMT, utilizando-se do arame ER70S-6, com amostras de aço carbono 1020.

Os arames são representados pela norma AWS A5 18, que define a representação de algumas propriedades mecânicas e químicas (ZACCARON, 2018), a classificação do arame é feita da seguinte forma:

- ER XX Y -Z
- **ER**: Eletrodo na forma de arame ou vareta;
- **XX**: Limite de ruptura no ensaio a tração em Ksi;
- **Y**: Pode ser S para eletrodo Sólido ou C para eletrodo composto;
- **Z**: Faixa de composição química.

A composição química do arame ER70S-6 é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Composição Química dos arames ER70S-6. Adaptado Lincoln (2011).

Análise Química (%)										
Classificação AWS	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER70S-6	0,06-0,15	1,4-1,85	0,8-1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5

Já as propriedades mecânicas são apresentadas nas Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades mecânicas do arame ER70S-6. Adaptado Lincoln (2011).

Valores Mínimos (MPa)			
Classificação AWS	Resistência tração	Resistência ao escoamento	Alongamento
ER70S-6	480	400	22%

Na Figura 47 pode-se observar as dimensões da peça de estudo com um comprimento de 160 mm, uma largura de 40 mm e altura de 5 mm. Todos os canais vão ter uma largura de 30 mm independente da sua direção.

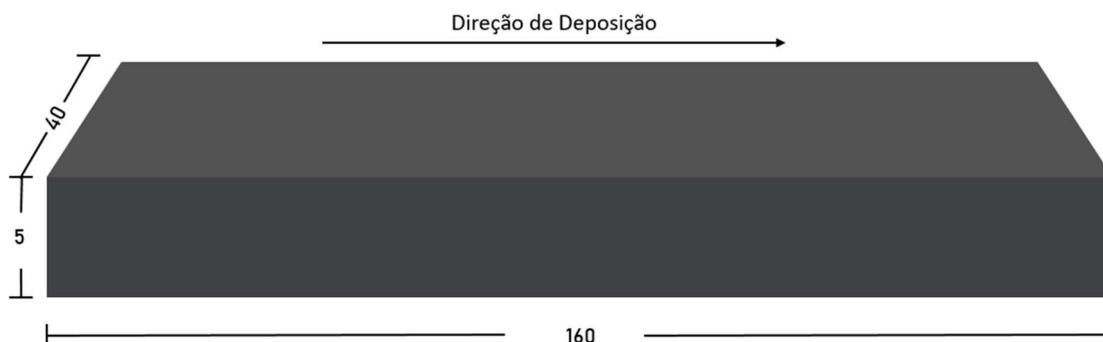


Figura 42: Figura representativa das dimensões da peça em mm.

3.3 Máquina Ferramenta

Para a realização do experimento, utilizou-se a máquina de usinagem vertical VEGA XH7132, localizado no Laboratório de Usinagem da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília no prédio SG9, a máquina pode ser vista na Figura 48. Na máquina foram feitos os ensaios para o fresamento de topo.



Figura 43: Máquina de usinagem vertical VEGA XH7132.

As especificações técnicas da máquina de usinagem vertical VEGA XH7132 são visualizadas na Tabela 5. Na Figura 49 é possível observar como foi a fixação da peça na máquina de usinagem vertical dos ensaios, além das posições das presilhas de fixação, bocais de fluido de corte e a fresa antes do início do fresamento.

Tabela 5: Especificações técnicas VEGA XH7132 (MADRAS, 2022).

Especificação	Unidade	XH7131
Deslocamento da mesa eixo X	mm	620
Deslocamento da mesa eixo Y	mm	350
Deslocamento da mesa eixo Z	mm	500
Tamanho da tabela	mm	920x320
T-slot (número-largura-distância)	mm	3/14/85
Distância da extremidade do fuso ao tampo da mesa	mm	100-600
Distância do centro do fuso até a guia da coluna	mm	395
Faixa de velocidade do fuso	rpm	60-6000
Velocidade de alimentação rápida (X, Y, Z)	mm/min	18000
Velocidade de alimentação (X, Y, Z)	mm/min	2,5 - 3000
Máx. dimensão da ferramenta	mm	120 x 200
Máx. peso da ferramenta	Kg	8
Precisão de posicionamento	-	± 0,015
Repetir precisão de posicionamento	-	± 0,0075
Motor principal (eixo)	Kw	3,7
Motor de alimentação	Kw	1,2
Bomba de resfriamento	Kw	0,1
Capacidade do magazine de ferramentas	quant.	16
Conicidade do eixo	-	BT40

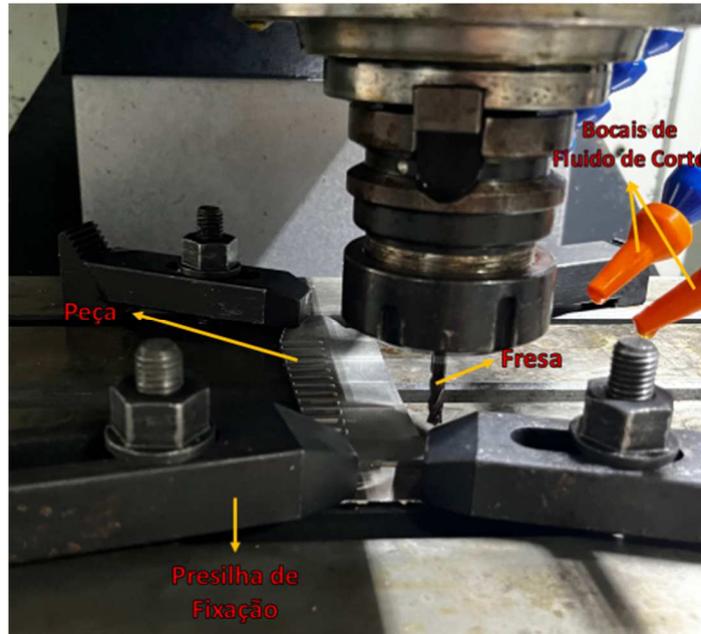


Figura 44: Fixação e posicionamento dos elementos para realização do fresamento (RIBEIRO et al.2023).

3.4 Ferramenta de Corte

Para o experimento de estudo, foi utilizado a fresa G9A69050 da fabricante YG-1, apresentada na Figura 50, de metal duro com revestimento em Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN), possuindo 4 arestas de corte e um diâmetro de 5 mm. Fresa utilizada pelo autor Ribeiro (2023) que comentou que sua escolha deu-se na busca de uma fresa com uma maior dureza e revestida, buscando um menor desgastes, assim tirando um fator que pode ser determinante nos resultados. As especificações da fresa utilizada neste experimento são observadas na Tabela 6.

- ▶ Adequado para aplicações de usinagem a seco em altas temperaturas.
- ▶ Excelentes fresas de alto desempenho.
- ▶ 4 cortes permitem melhores acabamentos nas peças.



Figura 45: Fresa G9A69050 da YG-1(YG-1 CO, 2023).

Tabela 6: Especificações da Fresa G9A69050 da YG-1(YG-1 CO, 2023).

Especificações	G9A69050
Diâmetro da fresa	5
Tolerância do Diâmetro da Fresa	0 – 0,03
Diâmetro da haste	5
Tolerância do Diâmetro da Haste	h5
Comprimento do corte	16
Comprimento total	51
Ângulo de hélice	30°
Material	Metal Duro
Revestimento	TiAlN

3.5 Fluido de Corte

Nos ensaios de fresamento de topo utilizou-se o fluido de corte BIO100e, óleo solúvel sintético biodegradável, da Biolub Química Ltda. Sua escolha deve-se a vários fatores, além de ser bom lubrificante, como o fato de ser anticorrosivo, não provocar manchas em metais e possuir uma excelente durabilidade (BQL, 2021).

Para sua preparação deve-se diluir o fluido na água, em uma proporção de 1:20 ou 5%, ou seja, 1 litro do fluido a cada 19 litros de água. Caso esteja-se trabalhando com usinagens mais severas a proporção muda para 1:10 ou 10%.

Na Tabela 7 pode-se visualizar os valores de concentração e as características físico-químicas do fluido, respectivamente e as características físico – químicas na Tabela 8.

Tabela 7: Tabela de concentrações do fluido BIO100e (BQL, 2021)

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

Tabela 8: Características físico-químicas do fluido BIO100e (BQL, 2021).

Características Físico - Químicas	
Aspecto Visual	Amarelo Esverdeado
Densidade 20/4 C - NBR 7148	1,065 g/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

Para aplicação do fluido utilizou-se três bocais, dois para a aplicação do fluido de corte e um para a saída do ar comprimido. Para a escolha da vazão e posição dos bocais, baseia-se nos menores resultados para Ra resultados encontrados pelo Ribeiro (2023) quando trabalhado com dois bocais. Os menores resultados para dois bocais foram encontrados para o teste 4 (canais 7 e 8), como observa-se na Figura 51, esses resultados foram encontrados para um fresamento com 2 bocais, uma vazão de 10 l/min e uma angulação de 45° graus dos bocais.

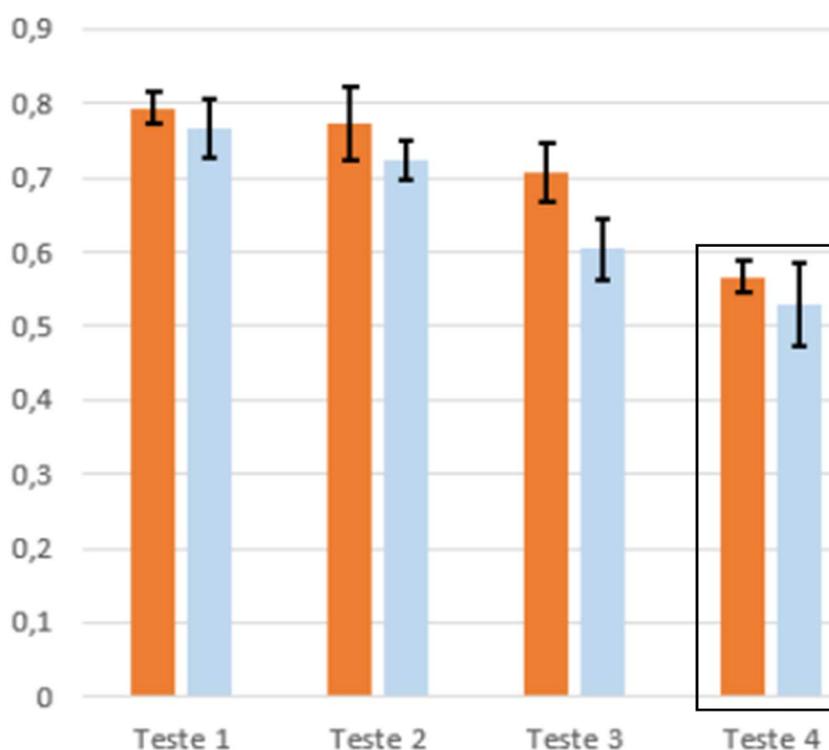


Figura 46: Valores de Rugosidade Média para os testes. Adaptado de Ribeiro (2023).

Na Figura 48 a), visualiza-se um esquema de como deve ser o posicionamento dos dois bocais de saída do fluido de corte, já na Figura 48 b) observa-se a configuração dos três bocais na Máquina que foi realizado os ensaios de fresamento.

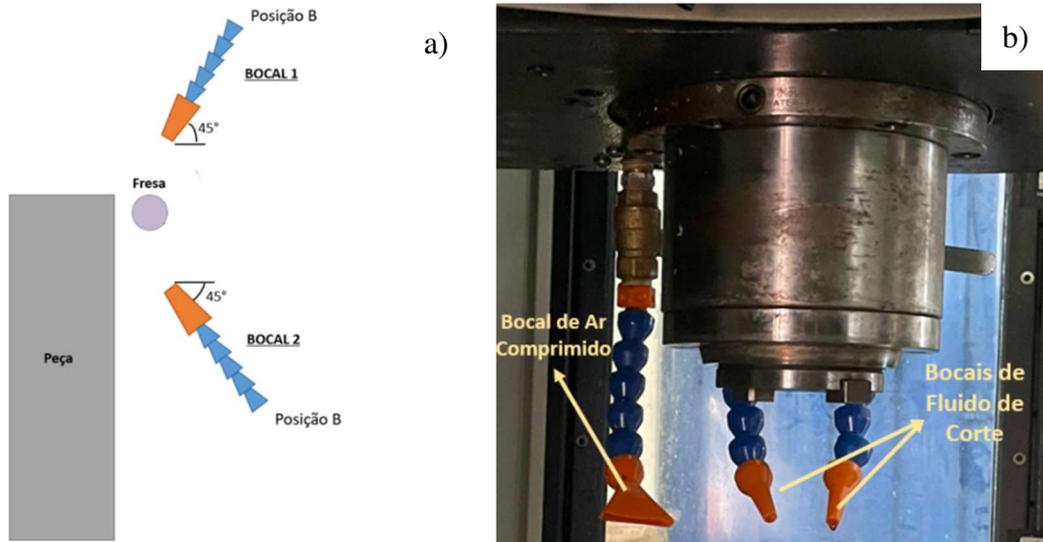


Figura 47: Representações do fluido de corte, a) Esquema de configurações dos bocais de fluido de corte. b) Bocais de saída de fluido de corte utilizados no experimento. Adaptado de Ribeiro (2023).

3.6 Parâmetros de Corte

Determinou-se os parâmetros de corte baseado em vários trabalhos de autores como Barreto (2022) e Ávila (2023). Para o parâmetro profundidade de corte, considerou-se os ensaios feito pela Barreto (2022), em que trabalhando com a mesma máquina dos ensaios deste trabalho optou por um valor de 2 mm, porém com essa profundidade teve a infelicidade de ter a quebra da fresa, obrigando a autora a optar por valores mais baixos de profundidade como, com essa observação optou-se utilizar a mesma profundidade de corte axial da segunda tentativa da autora de 0,25 mm.

Já para o valor do avanço analisou-se os ensaios feito pela Barreto (2022), comentados no capítulo passado, no qual ela encontrou os menores resultados de rugosidade média com um avanço de 0,020 mm/dente como observado na Figura 41. A velocidade de corte foi baseada no estudo do autor Ávila (2023), comentado no tópico passado, onde o autor investigou a influência da velocidade de na usinagem de topo da mesma peça utilizada neste experimento, assim, determinou-se as velocidades de 10 m/min com uma rotação de 637 rpm, que obteve os melhores resultados para o acabamento superficial, e a velocidade de 40 m/min com 2548 rpm que comentada pelo autor teve os menores valores de dureza e o pior acabamento visto visualmente, porém com o menor valor de Ra, levando o autor a ter uma conclusão de que as

peças obtidas por MADA não tem um comportamento esperado para fresamentos de materiais convencionais.

Devido a todas essas conclusões encontradas, os parâmetros de corte foram definidos conforme pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros de corte para os ensaios.

Parâmetro	Especificação
Profundidade de corte (a_p)	0,25 mm
Avanço por dente (f_z)	0,020mm
Velocidade de corte (v_c)	10 e 40 m/min
Número de dentes da fresa (z)	4

3.6.1 Direção de corte

Para o presente estudo da avaliação da influência da direção de deposição do arame, se subdividiu os ensaios de duas formas: a-) fresamento paralelo a direção de deposição do arame e na direção perpendicular à deposição do arame. Para os dois tipos de usinagem, serão realizados 2 ensaios e 2 réplicas, todos com os mesmos avanços e profundidade de corte comentados no tópico 3.1. Os parâmetros para cada ensaio de fresamentos são indicados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros de corte dos ensaios

Condição	Canal	V_c (m/min)	n (rpm)	V_f (mm/mn)	Direção em relação a deposição	f_z (mm)	a_p (mm)
Ensaio	1	10	637	63,7	0°	0,020	0,25
	2	40	2548	254,8	0°		
	3	10	637	63,7	90°		
	4	40	2548	254,8	90°		
Réplica	5	10	637	63,7	0°		
	6	40	2548	254,8	0°		
	7	10	637	63,7	90°		
	8	40	2548	254,8	90°		

Nos primeiros ensaios, fresamento na direção de deposição, utilizou-se da velocidade de 10 m/min com uma rotação de 637 rpm para um ensaio e uma réplica. Logo em seguida, realizou-se o experimento com uma velocidade de corte de 40 m/min e 2548 rpm, para um ensaio e uma réplica. A direção paralela a deposição pode ser vista no esquema da Figura 53.

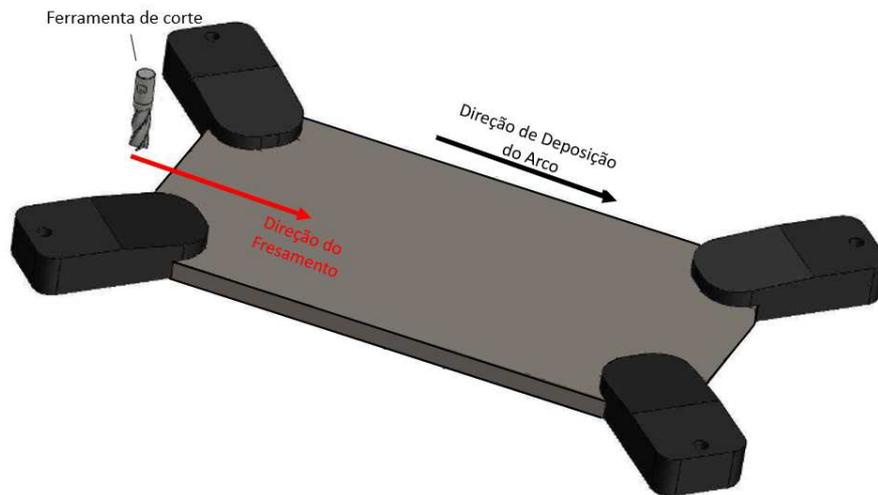


Figura 48: Direção do fresamento no sentido paralelo a deposição do arco. Adaptado de Ávila (2023).

Já para os ensaios na direção perpendicular a deposição, foi utilizado o mesmo modelo do ensaio anterior, entretanto a direção de corte será seguindo o esquema mostrado na Figura 54.

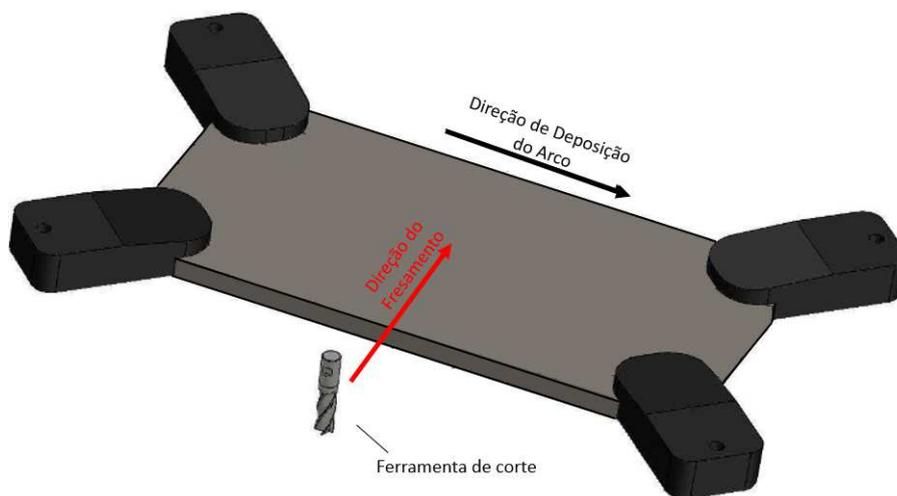


Figura 49: Direção do fresamento no sentido perpendicular a deposição do arco. Adaptado de Ávila (2023).

3.7 Variáveis de saída

Após a conclusão dos ensaios obtivemos para este estudo 3 variáveis de saída: análise superficial, vista de forma macro e micro, rugosidade e a dureza de cada canal.

3.7.1 Análise Superficial

A análise superficial é a verificação de forma macro e micro da peça. A análise macroscópica é feita por olho nu, na circunstância em que se observa as alterações sofridas pela peça como grandes manchas ou arrancamentos de materiais. A análise microscópica, onde visualiza-se defeitos como trincas, poros e defeitos ocorridos durante o processo. Toda essa análise segue a norma NBR NM 315 (AMN, 2017), que fornece as orientações para realização do teste, preparação da peça e ambiente ideal para os experimentos. A visualização microscópica foi feita pela máquina da Olympus, chamada LEXT OLS4100, suas dimensões são visualizadas na Figura 55. Microscópio apresenta 405 mm de altura, 358 mm de comprimento 276 mm de largura.

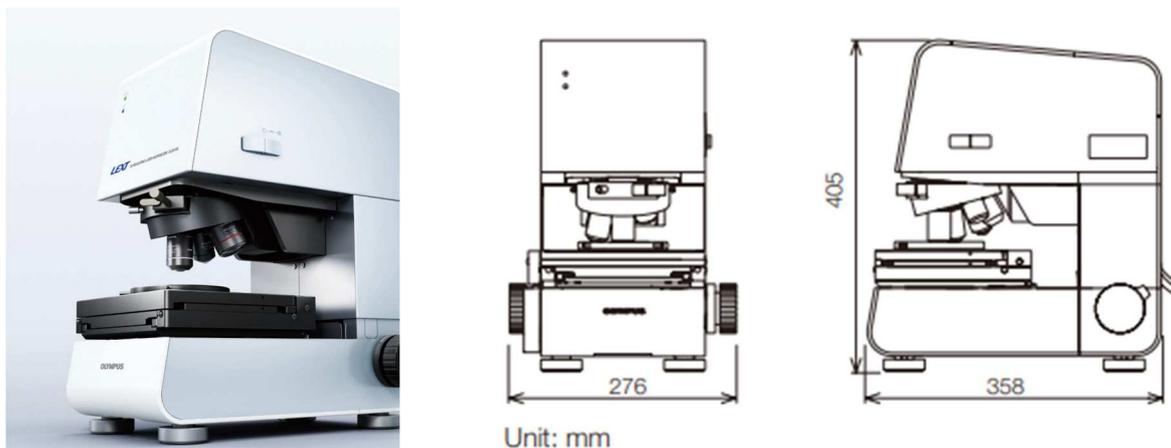


Figura 50: Microscópio de medição 3D a laser LEXT OLS4100 da OlympusLEXT (OLYMPUS, 2013).

3.7.2 Rugosidade

Os parâmetros de rugosidades que foram quantificados neste experimento são o o desvio aritmético médio (Ra), altura máxima do perfil (Rz) e o desvio quadrático médio (Rq), citados no tópico 2.2.3. Todhunter et al. (2017) comentam que são os parâmetros mais importantes na indústria. Toda medição segue a norma NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), no qual determina-se uma padronização com um cut-off de 0,8 mm e um comprimento de avaliação de 4 mm, utilizando-se do filtro de Gauss. Para a análise da rugosidade utilizou-se o rugosímetro portátil SJ-201 da Mitutoyo, visto na Figura 56.



Figura 51: – Rugosímetro modelo SJ-201 da Mitutoyo (SEG, 2022).

O processo de medição ocorreu da seguinte forma, a ponta do rugosímetro apalpa a superfície da peça, detectando suas irregularidades ao longo do deslocamento vertical da ponta, mostrando os valores na sua tela digital. O processo pode ser visto de forma clara na Figura 57.

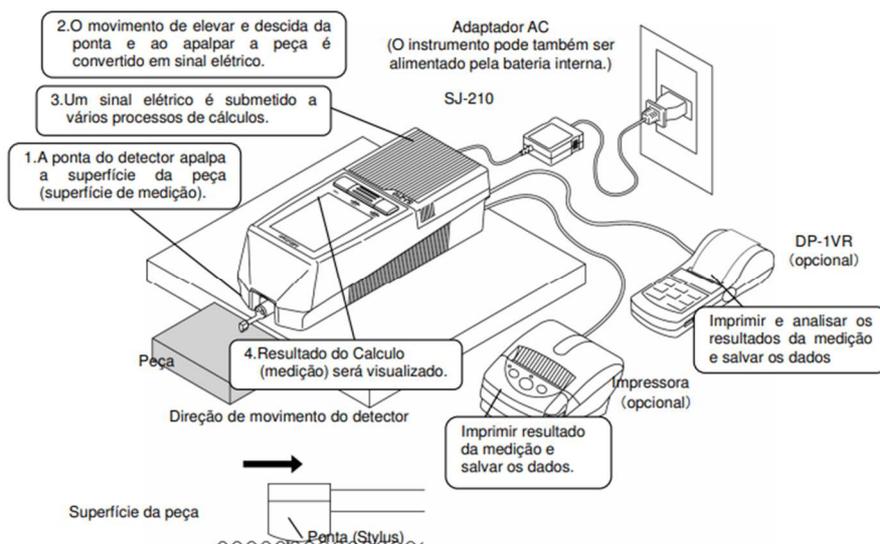


Figura 52: Processo de medição com o rugosímetro SJ-210 (MITUTOYO,2023).

3.7.3 Dureza

A medição da dureza foi realizada pelo Durômetro Zwick Roell ZHU250, usando a dureza Brinell (HB), nesta análise será comparado os valores de dureza antes e após o fresamento, de cada canal usinado. O durômetro utilizado neste estudo pode ser visto na Figura 58. A escolha dela se dá por ser uma máquina para ensaios de durezas altamente resistentes e com uma ótima precisão, além do seu manuseio intuitivo de forma prática e precisa (ZWICK,2023).



Figura 53: Durômetro Zwick Roell ZHU250 (ZWICK, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios, abordando os valores de rugosidade e dureza da superfície usinada com as diferentes condições testadas.

4.1 Rugosidades

Com o intuito de analisar a rugosidade da peça, foram realizadas três medições em cada canal, considerando Ra, Rq e Rz, nas direções do avanço. Após as medições, foi calculado a média e o desvio padrão para cada canal usinado. Na Tabela 11 é possível ver os valores obtidos para cada ensaio para a rugosidade Ra, vale ressaltar que, na tabela, destaca-se em amarelo o maior e menor valor das médias. Para próximas tabelas os canais em paralelo são definidos com a sigla Pa e os canais na direção perpendicular com a sigla Pe.

Tabela 11: Valores da rugosidade Ra para cada ensaio.

Canais	Ra1	Ra2	Ra3	Média	Desv. Padrão
Perpendicular 1	0,87	0,83	0,80	0,83	0,04
Pe2	0,78	0,74	0,76	0,76	0,02
Pe3	0,69	0,67	0,69	0,68	0,01
Pe4	0,60	0,62	0,60	0,61	0,01
Paralelo 1	0,24	0,25	0,25	0,25	0,01
Pa2	0,25	0,26	0,25	0,25	0,01
Pa3	0,22	0,24	0,22	0,23	0,01
Pa4	0,25	0,21	0,22	0,23	0,02
Superfície	5,00	4,97	4,01	4,66	0,56

Quando compararmos a superfície antes da usinagem com os valores máximos e mínimos encontrados para o parâmetro Ra depois do fresamento, observamos que o fresamento se mostra eficaz na melhoria da qualidade superficial da peça. Esse aprimoramento resultou em uma redução significativa da rugosidade, atingindo uma diminuição de 82% em relação à pior condição registrada nos resultados e uma diminuição de 95% quando comparada ao menor resultado encontrado. Essa comparação é ilustrada na Imagem 59.

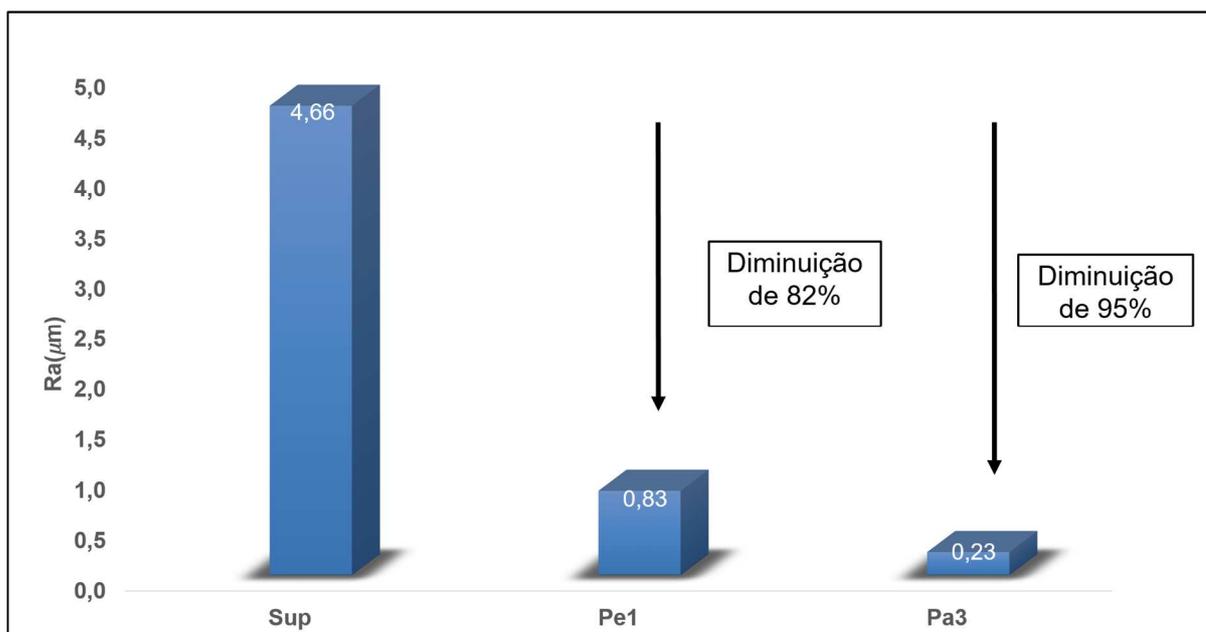


Figura 54: Comparativo da superfície com o maior e menor resultado de Ra.

Os valores se revelaram positivos ao serem comparados com os ensaios conduzidos pelo autor Gonçalves (2023). Este realizou experimentos utilizando o mesmo tipo de peça, mas com diferentes configurações de bocais. Vale destacar que o autor empregou uma velocidade de 10 m/min. O resultado mais favorável obtido por Gonçalves, em termos de rugosidade Ra, coincidiu com a configuração adotada neste estudo, utilizando dois bocais com uma angulação de 45° e na direção perpendicular à deposição do material. Nessa condição, o autor alcançou uma rugosidade Ra de 0,42 μm, representando uma redução de 86% em comparação com o valor de rugosidade de superfície antes da usinagem é de 3,05 μm. Essa diminuição foi ligeiramente superior à observada no pior resultado do experimento, que foi de 82%. Entretanto, isso evidencia que os resultados mais favoráveis, obtidos pelo autor (GONÇALVES, 2023) no sentido perpendicular, com variações nos parâmetros como avanço, não foram tão significativos quanto a redução causada pelo fresamento na direção paralela à deposição. Ao comparar os dois estudos, a rugosidade Ra ainda é menor no sentido paralelo (0,23 μm), representando cerca de 45% em relação à melhor configuração encontrada por Gonçalves no sentido perpendicular (0,42 μm).

Os valores da rugosidade Ra, junto com uma imagem micro das superfícies pode ser vista na Figura 60. Onde obteve-se o maior valor para o ensaio Pe1 e o menor para o ensaio Pa3.

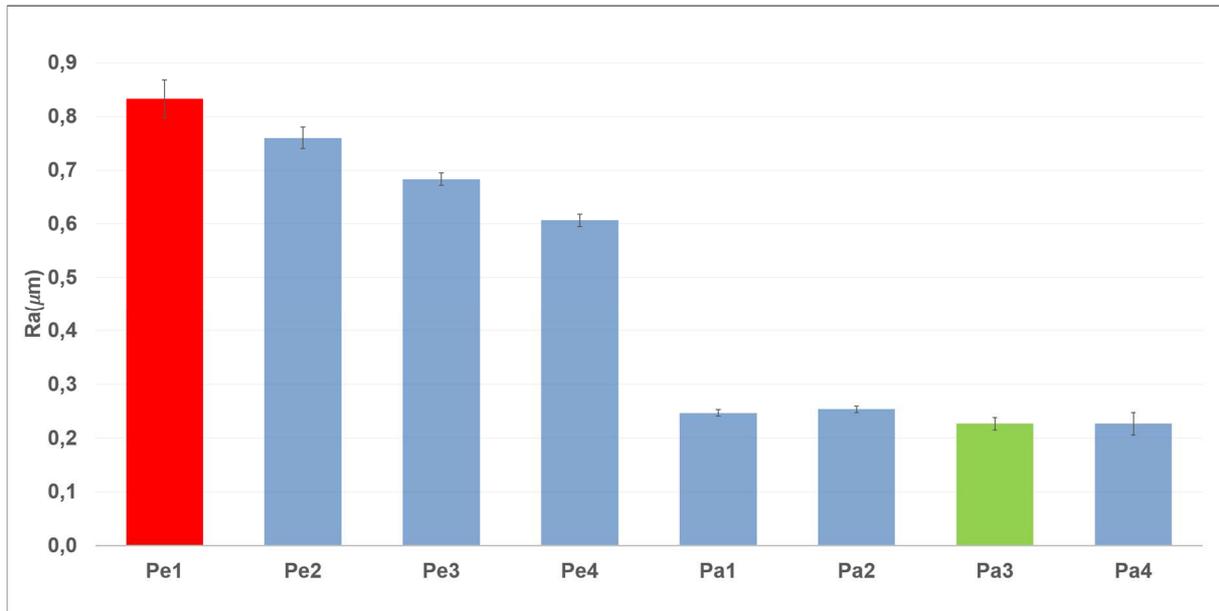


Figura 55: Valores da Rugosidade Ra para cada ensaio.

As discrepâncias nos valores apresentaram-se em direção oposta aos resultados encontrados pelo autor Avila (2022), onde este identificou diversas variações de rugosidade para diferentes velocidades de corte, variando de 10 a 50 m/min. Neste estudo, ao realizar a usinagem no sentido perpendicular, o autor observou os menores valores de rugosidade para a menor velocidade de corte, que foi de 10 m/min, registrando um valor aproximado de 0,160 μm . Em contrapartida, foram identificados alguns dos maiores valores de rugosidade para uma das maiores velocidades, 40 m/min, a mesma utilizada neste experimento, apresentando uma média de 0,218 μm . Essa lógica foi invertida no presente trabalho, onde, no sentido perpendicular à deposição, os resultados mostraram o menor valor de rugosidade com a maior velocidade de corte, que foi de 40 m/min, enquanto a maior rugosidade foi registrada com uma velocidade de corte de 10 m/min. Uma observação importante é que a medição realizada pelo autor Avila (2022) ocorreu na zona concordante, favorecendo, portanto, a obtenção de valores menores para a rugosidade Ra.

Comparando os valores de Ra nos ensaios realizados nas direções paralela e perpendicular, observamos que os valores são consideravelmente mais altos nos ensaios realizados a 90° em relação à deposição do material, chegando a uma diferença máxima de cerca de 70% para a mesma velocidade de corte (10 m/min). A menor discrepância é encontrada em uma velocidade de 40 m/min, onde a diferença no valor de Ra é de aproximadamente 62%. Cada diferença é detalhada na Figura 61.

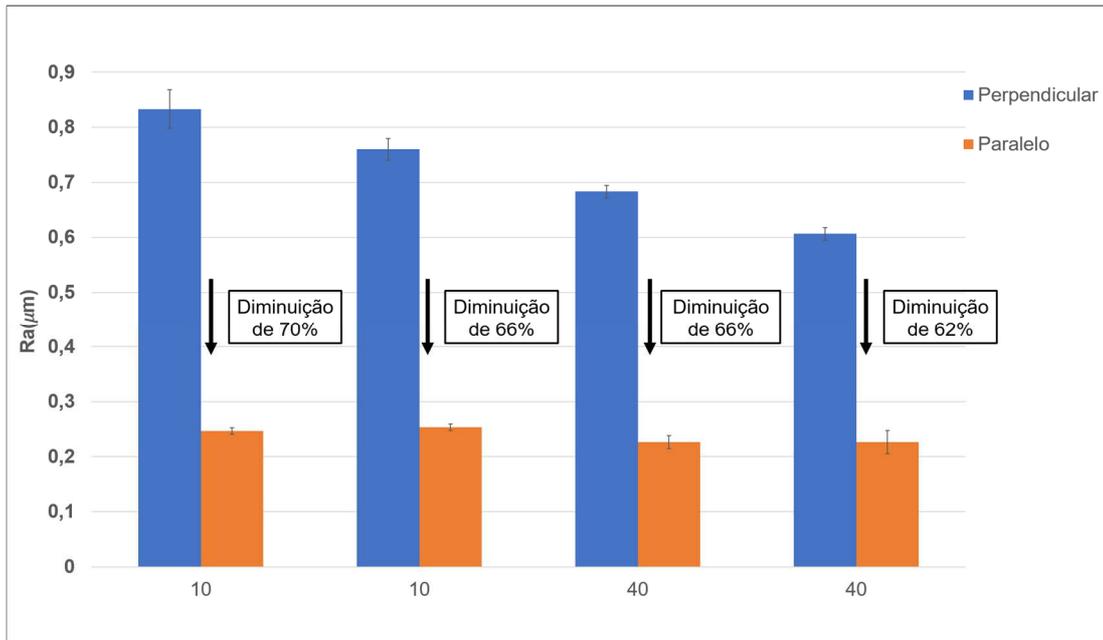


Figura 56: Comparação dos valores de Ra para os ensaios na direção paralela e perpendicular a deposição.

A rugosidade Ra apresentou um outro aspecto interessante. Ao comparar os valores na direção perpendicular, notamos uma considerável variação nas diferenças entre as velocidades de corte. Na velocidade mais baixa de corte, 10 m/min, observam-se valores significativamente mais altos em comparação com a velocidade de 40 m/min. Essa discrepância fica ainda mais evidente ao examinarmos os resultados no Box-plot, Figura 62, para a direção perpendicular, onde os valores mínimos na menor velocidade de corte ainda estão consideravelmente distantes dos valores máximos na maior velocidade de corte, com uma diferença de 6% entre esses extremos.

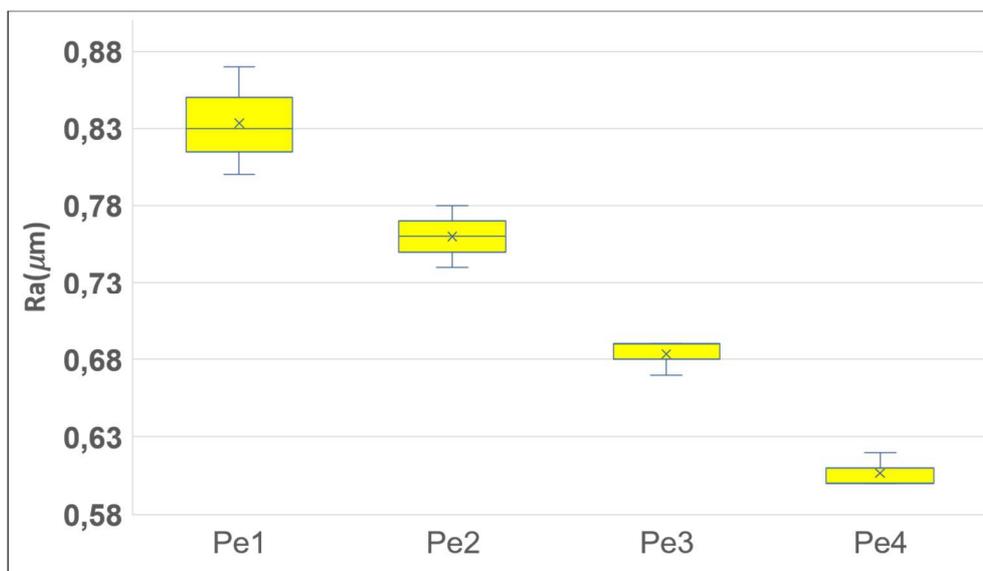


Figura 57: BoxPlot - Rugosidade Ra no Sentido Perpendicular.

Para a direção paralela, obteve-se os maiores resultados de rugosidade com uma velocidade de corte de 10 m/min, semelhantes aos ensaios na direção perpendicular. No entanto, em termos de diferença entre os valores, não foi o caso, pois os valores de rugosidade não apresentaram uma distância tão marcante, com medidas extremas na velocidade de corte de 40 m/min, apresentando valores semelhantes aos da menor velocidade. Essas diferenças podem ser observadas na Figura 63.

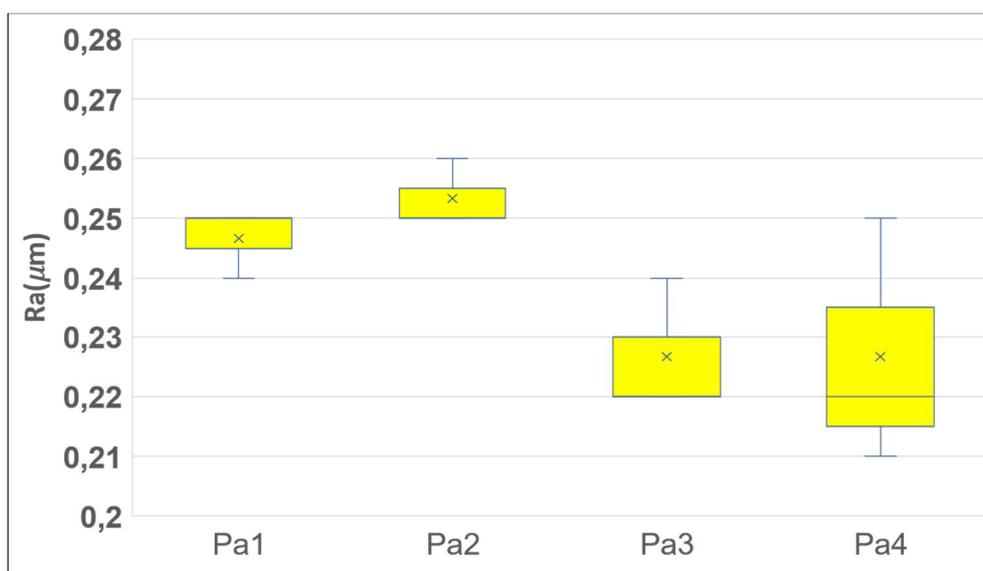


Figura 58: BoxPlot - Rugosidade Ra no Sentido Paralelo.

Na Tabela 12 é possível ver os valores obtidos para cada ensaio para a rugosidade Rz, vale ressaltar que, na tabela, destaca-se em amarelo o maior e menor valor das médias.

Tabela 12: Valores da rugosidade Rz para cada ensaio.

Canais	Rz1	Rz2	Rz3	média	Desv. Padrão
Perpendicular 1	4,800	4,920	4,730	4,817	0,096
Pe2	4,150	3,990	3,960	4,033	0,102
Pe3	3,870	4,010	3,780	3,887	0,116
Pe4	3,380	3,560	3,370	3,437	0,107
Paralelo 1	1,830	1,570	1,750	1,717	0,133
Pa2	1,580	1,680	1,700	1,653	0,064
Pa3	1,940	1,810	2,210	1,987	0,204
Pa4	2,140	1,690	1,480	1,770	0,337
Sup	31,420	25,310	25,490	27,407	3,477

No sentido perpendicular a rugosidade Rz obteve os maiores valores para a velocidade 10 m/min, porém isso se inverteu para o sentido paralelo aonde os maiores valores foram encontrados na velocidade de 40 m/m. A Figura 64 traz os valores da rugosidade Rz.

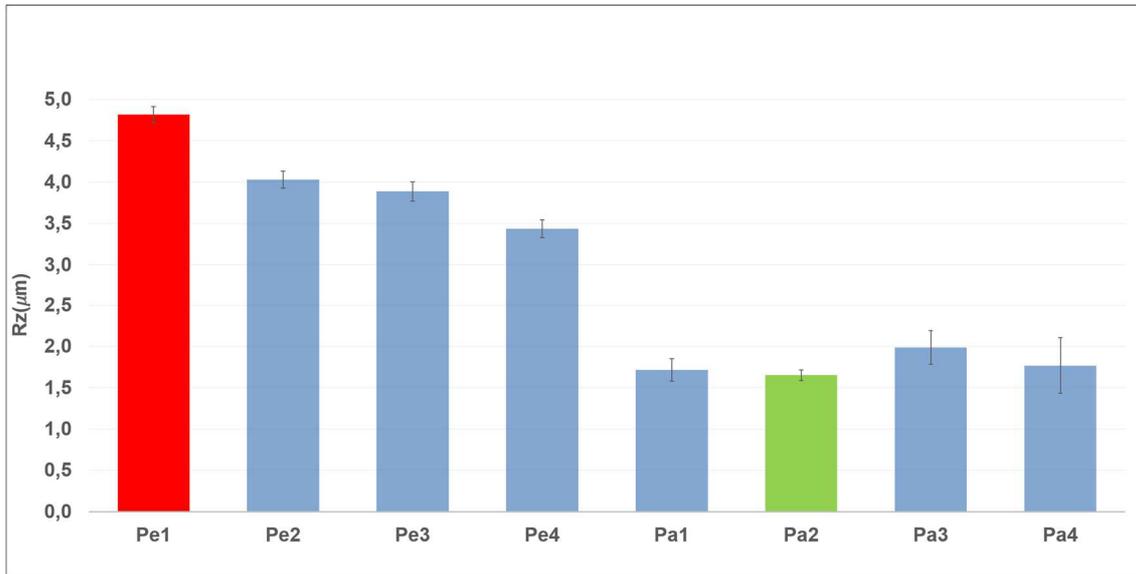


Figura 59: Valores da Rugosidade Rz para cada ensaio.

O autor Ribeiro (2022) conduziu o processo de usinagem na direção perpendicular, utilizando a mesma configuração de bocais e uma velocidade de 10 m/min. Com esses parâmetros, ele encontrou o menor valor de Rz, que foi de 4,03 µm, e o maior, de 4,17 µm. Esses resultados estão alinhados com os obtidos para os mesmos parâmetros no presente trabalho, onde identificamos o maior valor para 10 m/min e uma direção perpendicular de 4,817 µm, e o menor valor de 3,437 µm. Entretanto, ao compararmos os melhores valores encontrados pelo autor Ribeiro (2022), observamos que essas rugosidades se tornam elevadas quando contrastadas com uma usinagem na direção de deposição. Nessa condição, registramos nosso menor valor para a mesma velocidade de 1,653 µm, representando uma diferença de 2,377 µm em relação ao melhor valor encontrado por Ribeiro (2022), que foi de 4,03 µm.

No que diz respeito à comparação entre os dois tipos de direção, observamos diferenças significativas, sendo a maior delas entre os valores de Rz no canal Pe1 em comparação com o Pa1, com uma diferença de 64%. Todas as outras diferenças podem ser visualizadas na Figura 65.

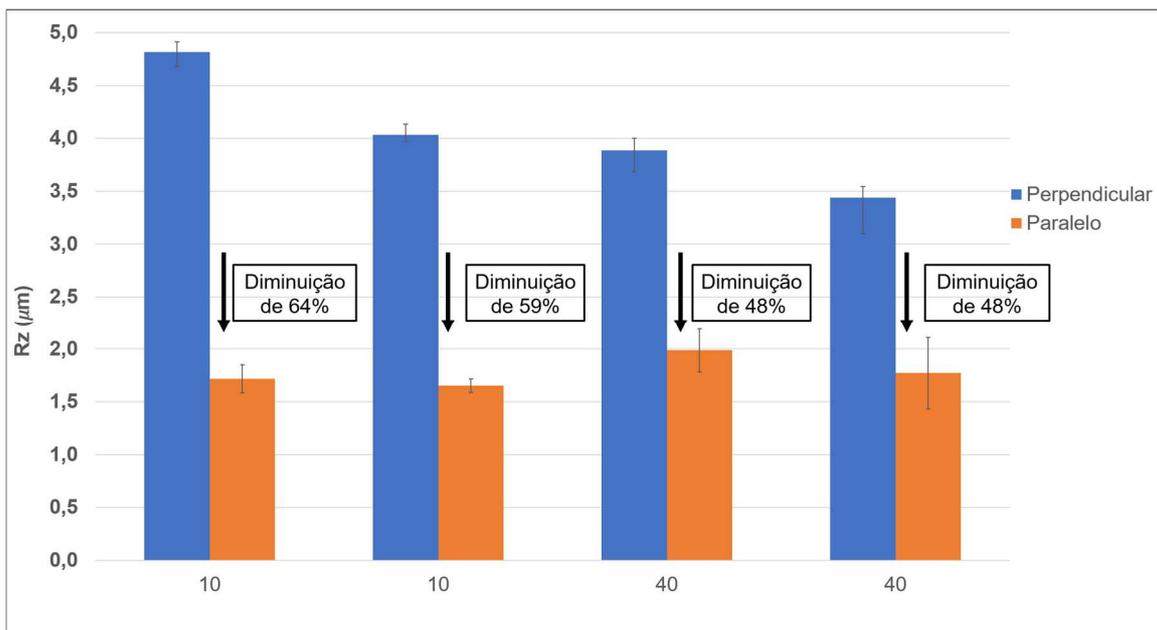


Figura 60: Comparação dos valores de Rz para os ensaios na direção paralela e perpendicular a deposição.

Nas Figuras 66 e 67, são exibidos os Box Plot para a rugosidade Rz. Vale destacar que a média de Rz nas direções paralelas foi maior na velocidade de 40 mm/min, o que contrasta com os valores obtidos nos canais fresados na direção perpendicular à deposição.

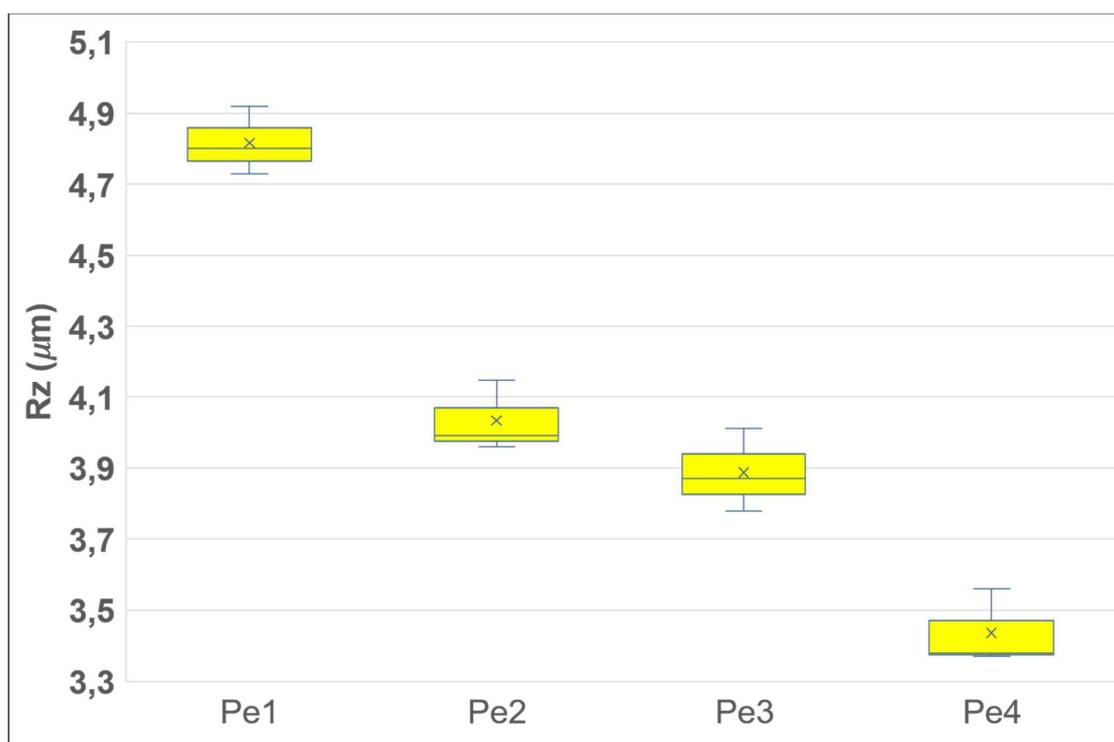


Figura 61: BoxPlot - Rugosidade Rz no Sentido Perpendicular.

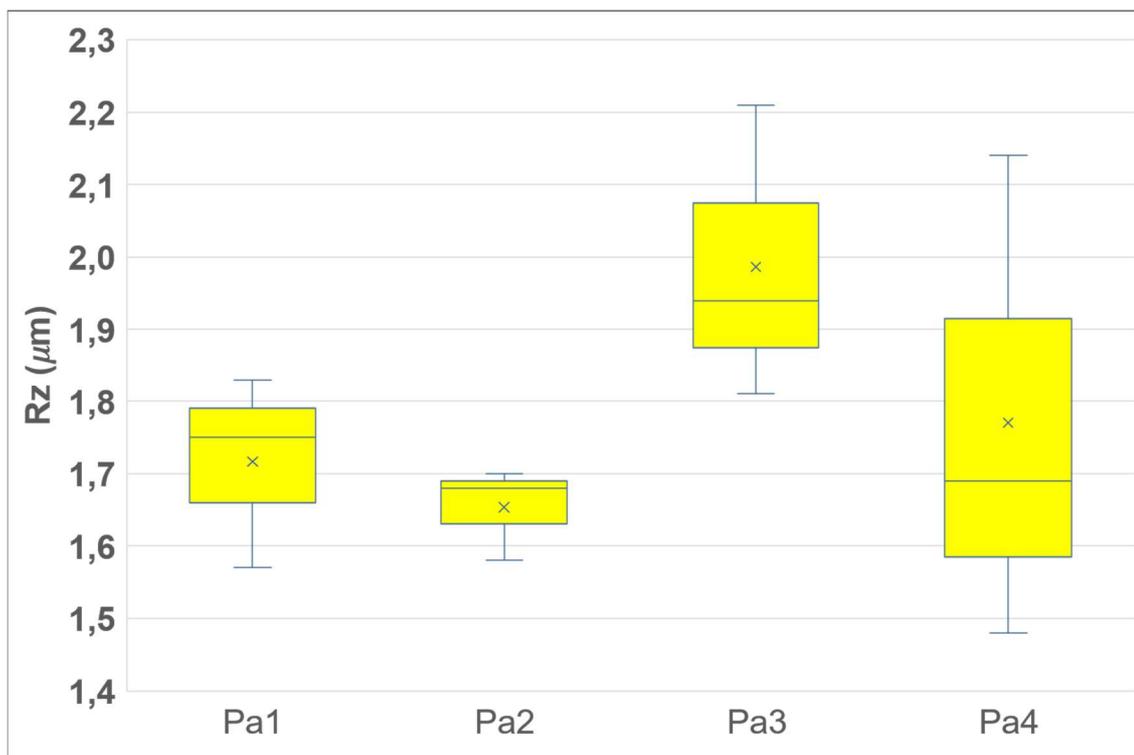


Figura 62: BoxPlot - Rugosidade Rz no Sentido Paralelo.

Os valores de Rq, tanto para os sentidos perpendiculares quanto paralelos, podem ser visualizados na Tabela 13, juntamente com as médias e o cálculo do desvio padrão.

Tabela 13: Valores da rugosidade Rq para cada ensaio.

Canais	Rq1	Rq2	Rq3	média	Desv. Padrão
Perpendicular 1	1,06	1,03	0,99	1,027	0,035
Pe2	0,95	0,92	0,93	0,933	0,015
Pe3	0,84	0,83	0,84	0,837	0,006
Pe4	0,74	0,76	0,74	0,747	0,012
Paralelo 1	0,3	0,3	0,31	0,303	0,006
Pa2	0,31	0,32	0,32	0,317	0,006
Pa3	0,29	0,31	0,31	0,303	0,012
Pa4	0,33	0,27	0,28	0,293	0,032
Sup	6,27	5,93	5,18	5,793	0,558

Os valores podem ser visualizados na Figura 68, onde observamos a maior média no ensaio na direção perpendicular, a uma velocidade de 10 m/min, com um valor de 1,027 μm , enquanto a menor média foi registrada no ensaio na direção paralela, a uma velocidade de 40

m/min, com um valor de $0,293 \mu\text{m}$. A Figura 69 apresenta graficamente os resultados de cada ensaio.

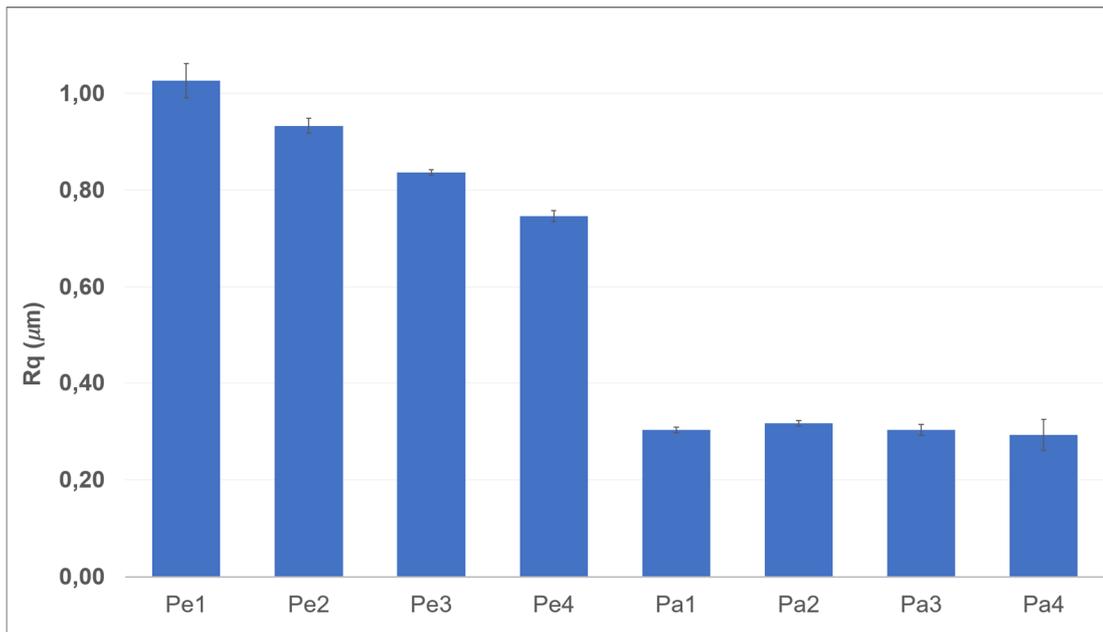


Figura 63: Valores da Rugosidade Rq para cada ensaio.

Em relação à comparação das mesmas velocidades, mas com direções diferentes, observamos a maior diferença nas velocidades de 10 m/min, com uma distinção nas médias de até 70%. Todas essas variações podem ser visualizadas na Figura 69.

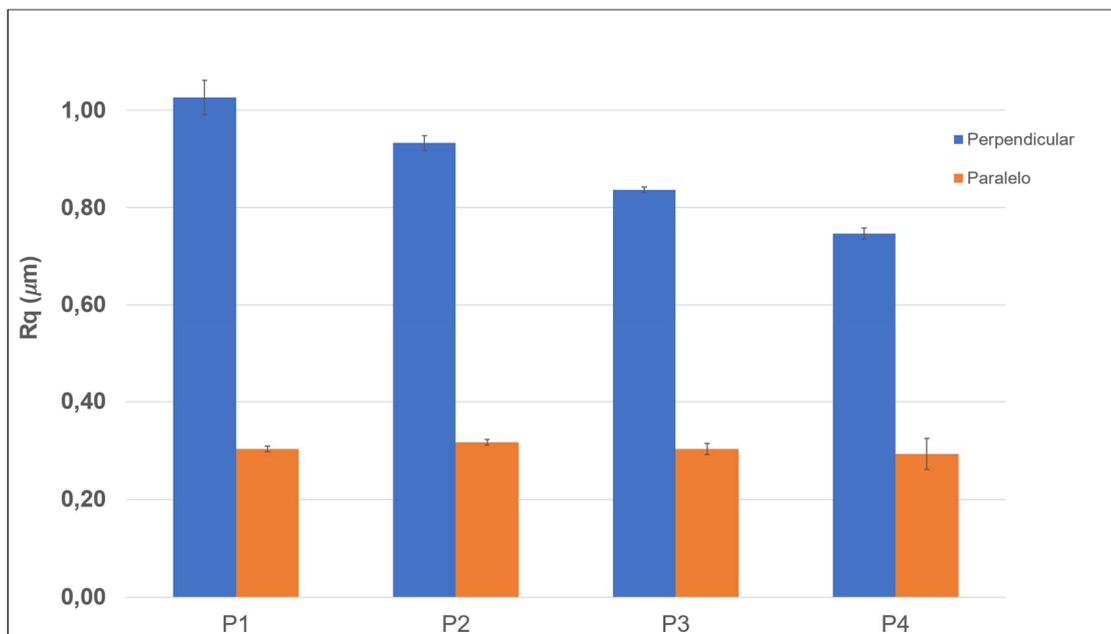


Figura 64: Comparação dos valores de Rq para os ensaios na direção paralela e perpendicular a deposição.

Os valores das rugosidades seguiram os resultados esperados para este trabalho, onde se antecipava a ocorrência de rugosidades menores no sentido de 0° em relação à deposição. Isso se deve ao fato de que, ao fresar nesse sentido, a ferramenta tende a seguir a orientação das camadas depositadas, resultando em menos descontinuidades e irregularidades no processo. Com menos interrupções, a fresa gera menor atrito e, conseqüentemente, menos calor durante o processo. Essa redução de calor é benéfica para a obtenção de valores de rugosidade mais baixos, uma vez que o aumento da temperatura no processo pode induzir deformações térmicas e influenciar nas rugosidades. Além disso, temperaturas mais baixas diminuem as chances de ocorrência de deformações não desejadas.

Por outro lado, o processo a 90° enfrenta uma série de desafios que contribuem para rugosidades mais elevadas. Nesse sentido, o processo percorre diversas camadas, sofrendo com encontros mais frequentes de heterogeneidades na peça. As junções entre camadas podem ser menos uniformes no sentido a 90°, resultando em maior propensão a descontinuidades, o que, por sua vez, contribui para interrupções mais frequentes e, conseqüentemente, para o aumento da rugosidade. Devido à trajetória entre as junções de camadas, esse processo enfrenta atrito mais intenso, resultando em maiores vibrações e temperaturas de corte.

4.2 Dureza

Para todos os canais foi coletado a dureza Brinell, de forma que cada canal teve três dados coletados, para a dureza da superfície foi utilizada os valores encontrados pelo autor Gonçalves (2023), que utilizou a mesma peça para seus estudos, além de fazer o mesmo número de coletas. A Tabela 14 traz os valores encontrados para dureza em HB.

Tabela 14: Valores de dureza Brinell dos canais em HB.

Canais	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	média	Desv. Padrão
Perpendicular 1	142	135,1	145,1	140,733	5,119
Pe2	142,4	149	163,6	151,667	10,849
Pe3	153,4	151,7	161,2	155,433	5,066
Pe4	165,2	152,8	179,2	165,733	13,208
Paralelo 1	135,2	145,8	146	142,333	6,178
Pa2	150	158,1	137	148,367	10,644
Pa3	146,7	147,6	132,6	142,300	8,412
Pa4	165,2	119,1	136,6	140,300	23,272
Sup	138,000	138,900	139,200	138,700	0,624

A Figura 70 oferece uma representação visual das médias dos valores de dureza. A maior média foi identificada no canal de ensaio perpendicular com uma velocidade de 40 mm/min, enquanto a menor média ocorreu no canal com a mesma velocidade, mas no sentido paralelo.

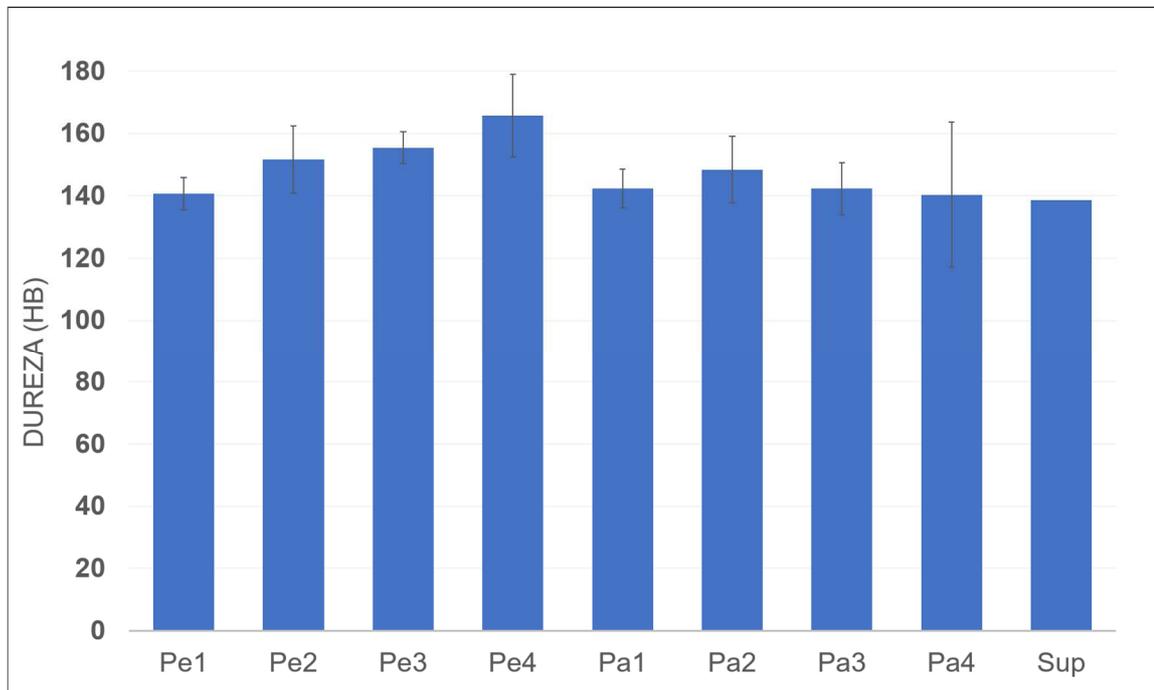


Figura 65: Gráfico da dureza registrada nos canais e na superfície da peça.

Os valores de dureza podem ser comparados aos estudos de Avila (2022) e Gonçalves (2023), nos quais ambos realizaram comparações utilizando o mesmo tipo de arame ER70S-6. Após conduzirem seus ensaios com uma velocidade de 10 m/min, os autores Avila (2022) e Gonçalves (2023) obtiveram uma dureza média em seus canais de 159,07 HB e 146,87 HB, respectivamente. Esses resultados estão próximos aos encontrados neste estudo, onde a maior dureza registrada para a mesma velocidade foi de 151,67 HB, representando uma diferença de 4,88% em relação aos resultados do primeiro autor e 3,27% em relação ao segundo autor. Comparando os valores de dureza para uma velocidade de 40 m/min, o autor Avila (2022) registrou uma dureza média de 131,9 HB, o valor mais baixo encontrado por ele. É relevante destacar que esse canal apresentou uma série de arrancamentos de material durante o processo. No presente estudo, a dureza para o canal de 40 m/min, na direção perpendicular, atingiu o valor mais elevado de 165,73, apresentando uma diferença significativa de aproximadamente 25,39%. Entretanto, devido a alguns problemas encontrados pelo autor, a comparação não possui valores tão expressivos. Essas comparações evidenciam que a dureza apresentou

resultados semelhantes aos estudos envolvendo o mesmo processo de usinagem, a mesma peça e a mesma velocidade de corte.

Analisando a comparação das mesmas velocidades, mas em direções diferentes, observamos uma tendência de valores mais elevados nos canais fresados no sentido perpendicular. Além disso, é importante notar que todos os canais apresentaram valores superiores em relação à superfície medida pelo autor Gonçalves (2023). Todas essas análises estão disponíveis na Figura 71.

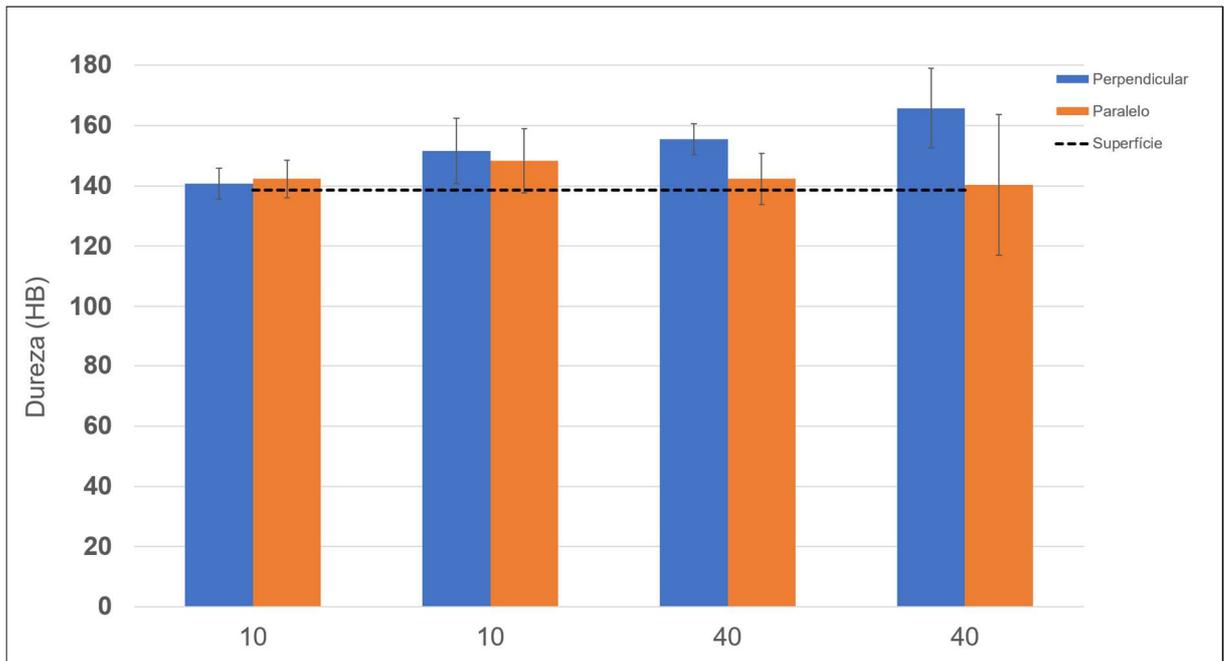


Figura 66: Comparação dos valores de Dureza Brinell para a superfície e os ensaios na direção paralela e perpendicular a deposição.

A dureza apresentou uma considerável variação em seus valores, tornando desafiada a afirmação da influência dos parâmetros de corte em seus resultados. Ao observar a Figura 72, é possível notar que, na direção perpendicular, o aumento da velocidade de corte resultou em um aumento na dureza. No entanto, na direção paralela, ocorreu o oposto, onde as maiores velocidades resultaram em uma dureza menor em comparação com as menores.

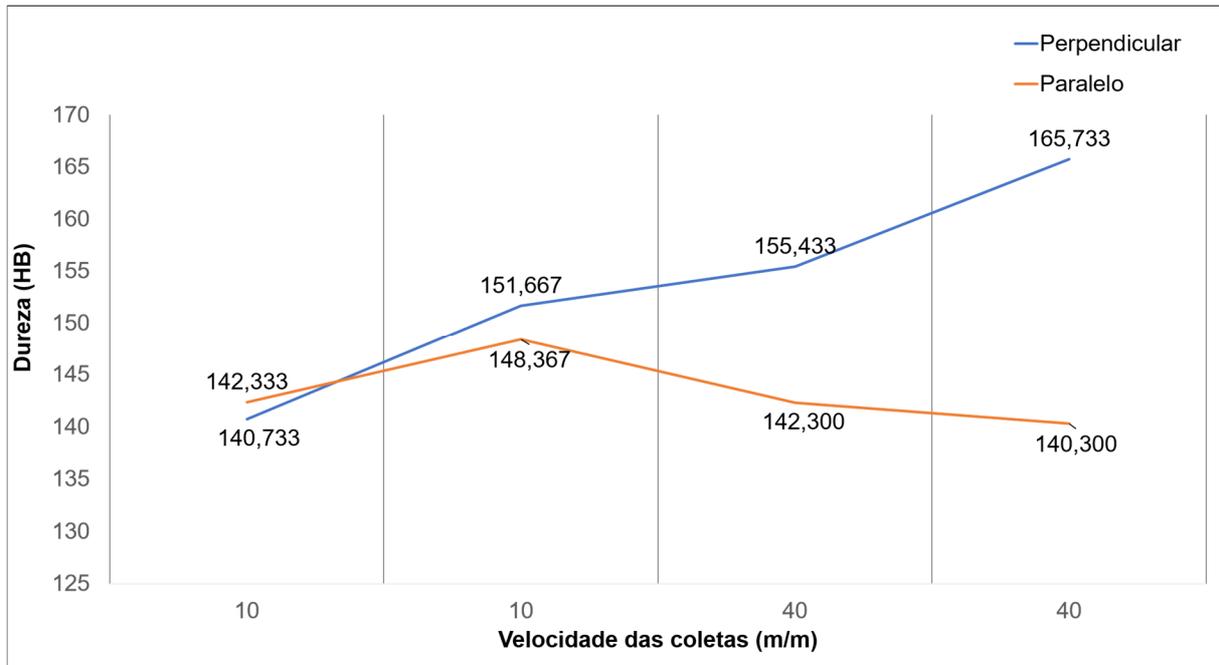


Figura 67: Comparação dos valores de dureza para cada tipo de ensaio.

Em relação à dureza, os resultados assemelham-se aos encontrados em estudos similares ao presente experimento. Apesar dos valores serem bastante próximos, observa-se uma notável diferença nas medições de dureza entre os canais na direção perpendicular e paralela. Na direção perpendicular, registrou-se maiores valores de dureza do material, com um aumento significativo à medida que a velocidade de corte foi incrementada. Essa observação pode ser atribuída a diversos fatores, tais como a possível influência da orientação dos grãos no material da peça, onde a direção perpendicular pode afetar a estrutura cristalina. Outro ponto a considerar é que, nesse sentido, a deformação plástica pode ter sido mais acentuada, resultando em um aumento da dureza da peça.

Um aspecto adicional que contribui para o aumento da temperatura na direção perpendicular, especialmente em velocidades mais elevadas, relaciona-se à temperatura do processo. Como mencionado nos resultados da rugosidade, a temperatura tende a ser mais elevada na direção perpendicular. O efeito térmico pode provocar alterações na estrutura do material, podendo resultar em recristalização e redistribuição dos grãos. Essas mudanças na microestrutura influenciam as propriedades mecânicas, notadamente a dureza.

Em síntese, a diferença de dureza entre as direções de usinagem pode ser atribuída a uma combinação de fatores, incluindo orientação dos grãos, deformação plástica e efeitos térmicos. Dessa forma, análises futuras são necessárias para melhor compreender as variações observadas nos resultados de dureza.

4.3 Análise Superficial

Na próxima seção, serão exibidas imagens obtidas por microscópio dos canais fresados. A Figura 73 apresenta a fotografia microscópica do Canal 1 (10 m/min) na direção perpendicular, com uma ampliação de 10x. Adicionalmente, são fornecidos um mapa de calor 2D e um mapa de calor 3D da imagem selecionada. Durante a observação da Figura 73, é possível identificar diversas irregularidades na peça. Destaca-se que o Canal Pe1 apresentou a maior rugosidade.

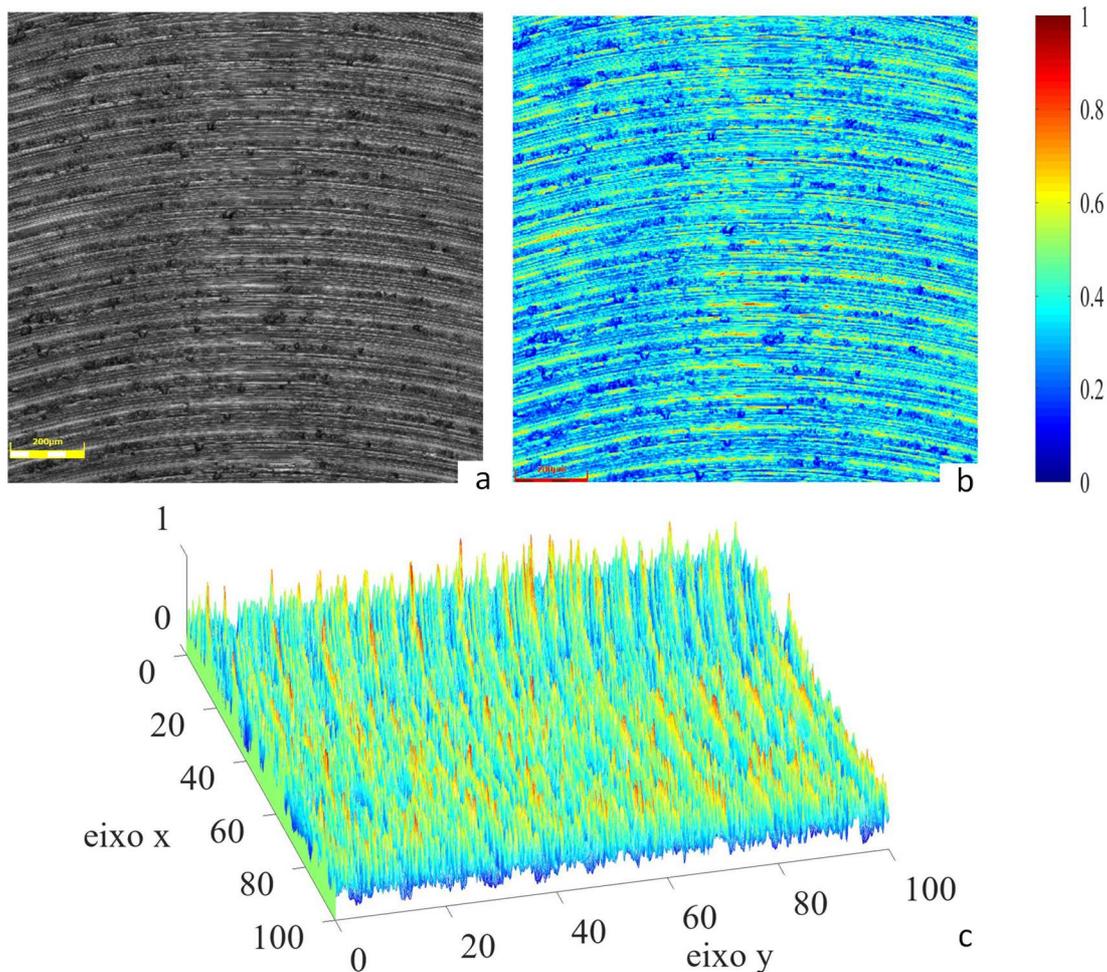


Figura 68: a) micrografia canal Pe1 em 10x. b) mapa de calor 2d. c) mapa de calor 3d

A Figura 74 mostra uma alta rugosidade na peça, com muitas irregularidades, principalmente na região central do canal, onde foram coletados os dados de rugosidade. Essas irregularidades são chamadas de poros, um tipo de defeito comum em materiais depositados. Poros também foram observados no trabalho do Ribeiro em 2022 (Figura 74B), mas o número de poros no trabalho atual é significativamente maior. Essa diferença é evidente na Figura 74.

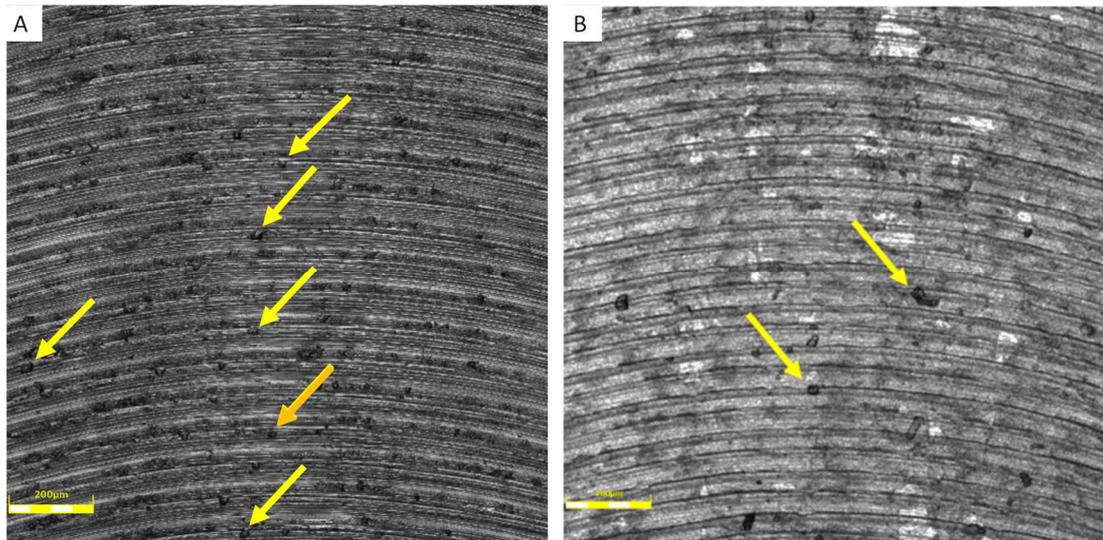


Figura 69: a) defeitos destacados no canal Pe1 em 10x. b) defeitos destacados pelo autor Ribeiro (2022).

De acordo com Aurich (2009), rebarbas são projeções de material indesejadas. Schafer (1978), por sua vez, define rebarbas como partes da peça que estão localizadas na borda, porém fora de uma dimensão especificada. No canal Pe1, essas geometrias projetadas para fora da peça foram pouco encontradas, conforme mostrado na Figura 75.

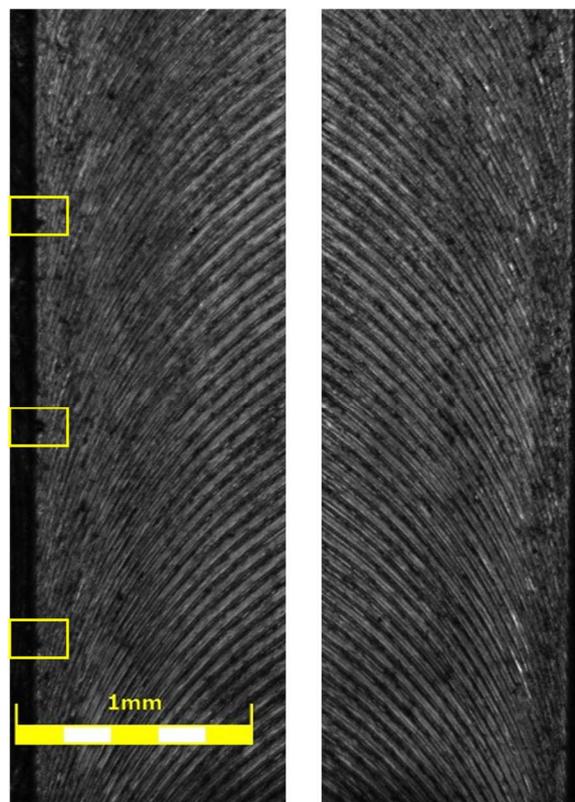


Figura 70: Análise de rebarbas no canal Pe1.

A Figura 76 mostra o canal Pa1, fresado no sentido paralelo à deposição do material. A superfície do canal é mais lisa e com menos imperfeições no centro, quando comparada com a mesma superfície e escala de micrografia mostrada nas Figuras 73A e 74A.

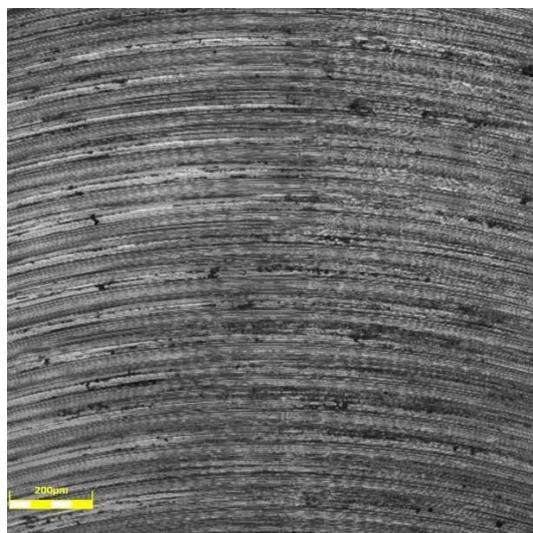


Figura 71: Micrografia canal Pa1.

Apesar de exibir menores rugosidades em comparação com o canal semelhante, porém com uma orientação diferente, o canal Pa1 revelou um defeito notável, conforme evidenciado na Figura 77. Nela, são visíveis defeitos semelhantes aos encontrados no estudo de Ribeiro (2022), Figura 77b. Nessas figuras, é notável uma avaria que não é resultado do fresamento, mas sim da deposição do material, assemelhando-se a um precipitado ou heterogeneidade nas fases do material. Além disso, na Figura 77a, é perceptível que o canal Pa1 não exibe rebarbas notáveis.

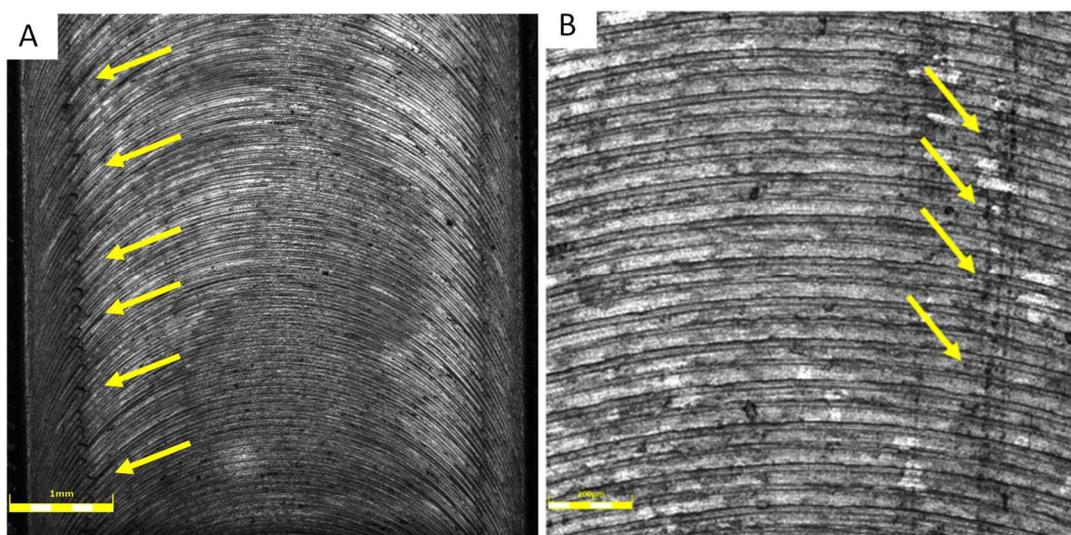


Figura 72:a) Defeito, oriundo da deposição, encontrado no canal Pa1. b) Defeitos encontrados pelo autor Ribeiro (2022)

Na Figura 78, apresentamos uma análise abrangente do canal fresado a 10 m/min, na direção paralela à deposição. Nela, é possível observar os defeitos resultantes da deposição, com rebarbas pouco perceptíveis. Além disso, analisamos a diminuição do número de defeitos à medida que o canal se afasta da borda. Nas Figuras 78A, 78B e 78C, destacamos diferentes segmentos do canal Pa1, iniciando com o começo do canal em 78A, passando pela parte central em 78B e chegando ao final em 78C.

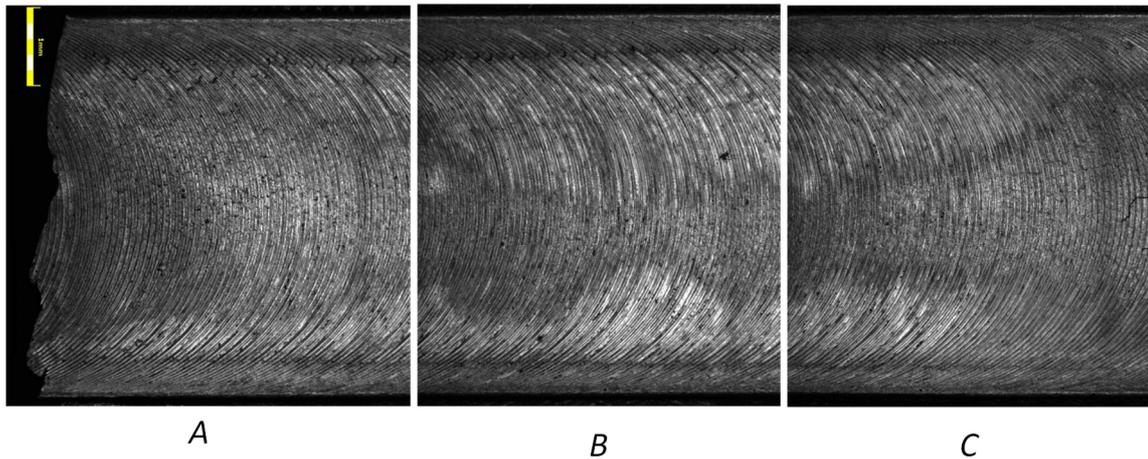


Figura 73: Diferentes partes do canal Pa1 a) início. b) meio. c) final.

O canal P2 foi usinado com velocidades de 10 m/min, e na Figura 79, realizamos uma comparação entre os canais usinados nas direções paralela (79A) e perpendicular (79B), juntamente com os respectivos mapas de calor 2D nas Figuras 79 C e D. Os mapas de calor proporcionam uma clara distinção dos defeitos em cada canal. Nota-se que o canal fresado na direção perpendicular (Figura 79A e D) exibe o maior número de defeitos, destacados por tons mais escuros, refletindo em cores azuis no mapa de calor. Por outro lado, o canal fresado no sentido da deposição, Pa2, revelou menos imperfeições e apresentou a menor rugosidade em comparação com o Pe2.

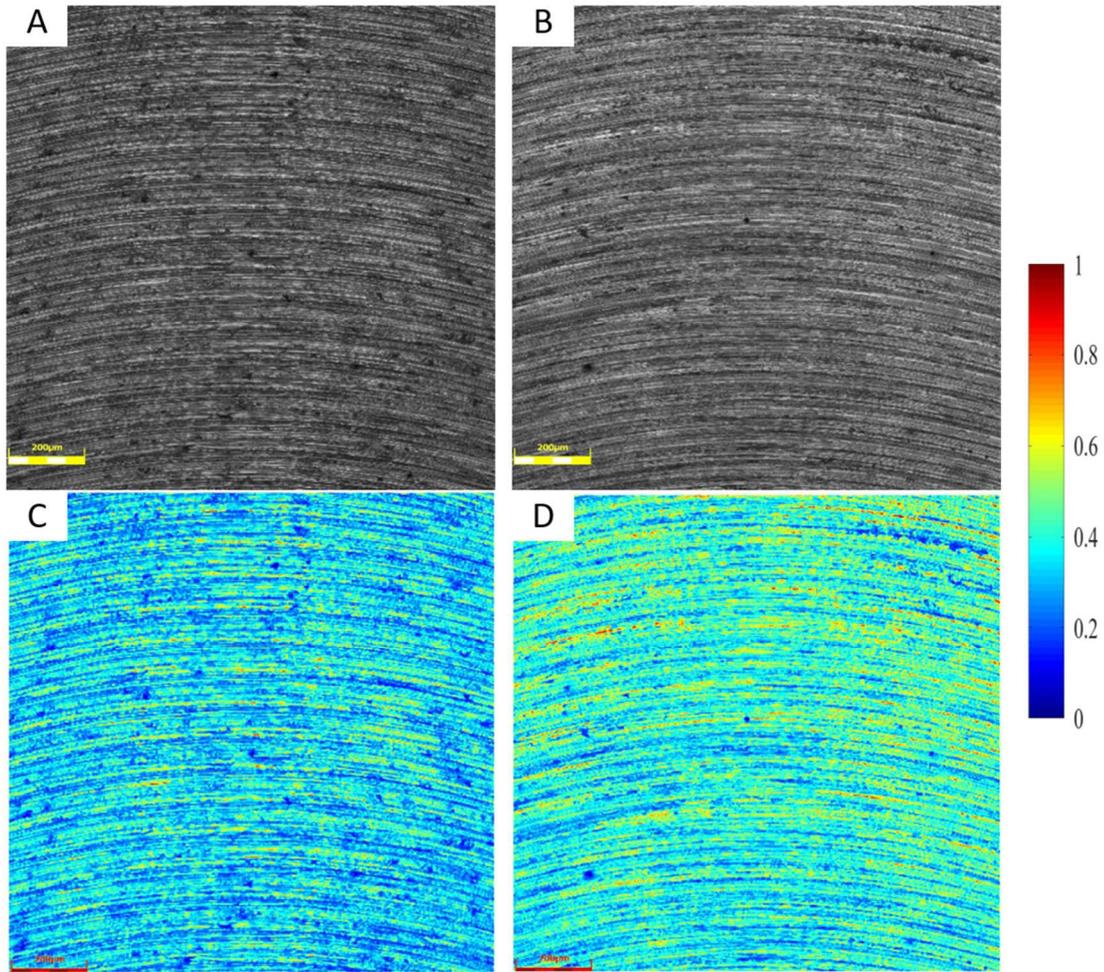


Figura 74: Canais 2 fresados em 10 m/min: a) Canal Pa2. b) Canal Pe2. c) Mapa de calor do canal Pa2. d) Mapa de calor do canal Pe2.

Um fato curioso foi que, após a finalização do fresamento do canal Pe2, um cavaco ficou grudado na superfície do canal. Esse cavaco pode ser visto na Figura 80.

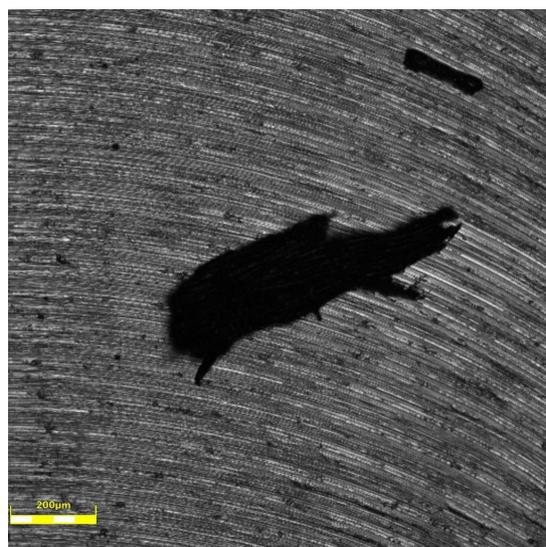


Figura 75: Cavaco na superfície do canal Pe2.

No que diz respeito às rebarbas, ambos os Canais 2 não exibiram geometrias tão evidentes, tanto interna quanto externamente. Essa característica torna-se mais evidente na Figura 81, onde o Canal Perpendicular é representado na Figura A, enquanto o Canal Paralelo é mostrado na Figura B.

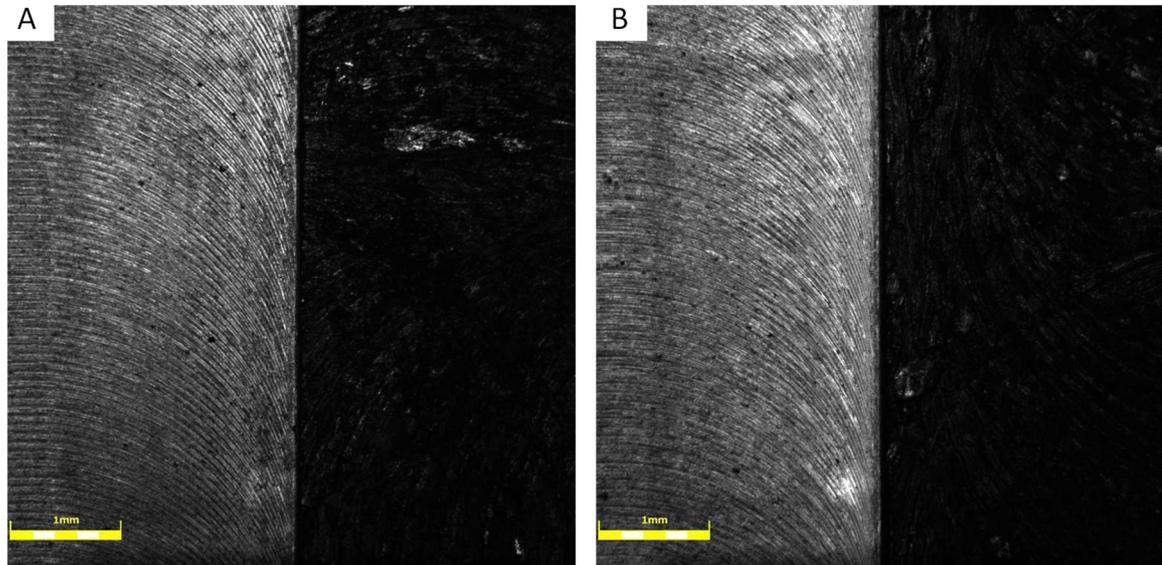


Figura 76: Análise de rebarbas: a) canal Pe2. b) Canal Pa2.

Os Canais 3 foram usinados a uma velocidade de 40 m/min, e os resultados obtidos foram superiores aos encontrados pelo autor Ávila (2022), que também usinou com a mesma velocidade de corte. Ávila identificou diversos defeitos, como arrancamento do material causado pela fresa e presença de poros dentro do canal. Na Figura 82, são apresentados os canais usinados por Ávila, com o lado esquerdo representando o sentido concordante e o lado direito representando o canal no sentido discordante. Vale ressaltar que esses canais foram usinados na direção perpendicular à deposição do arame, enquanto os canais Pe3, obtidos neste estudo, foram usinados com uma velocidade de corte 40 m/min. Fazendo uma comparação com os dois canais, no presente estudo, não observamos nenhum arrancamento de material, embora seja perceptível a presença de poros no canal Pe3 e marcas que poderiam indicar *chatter*. O *chatter* é considerado um dos problemas que podem ocorrer no fresamento de topo. Esse problema indica que houve vibrações durante o processo e tem causas variadas, como a falta de rigidez na máquina ou problemas na fixação da ferramenta.

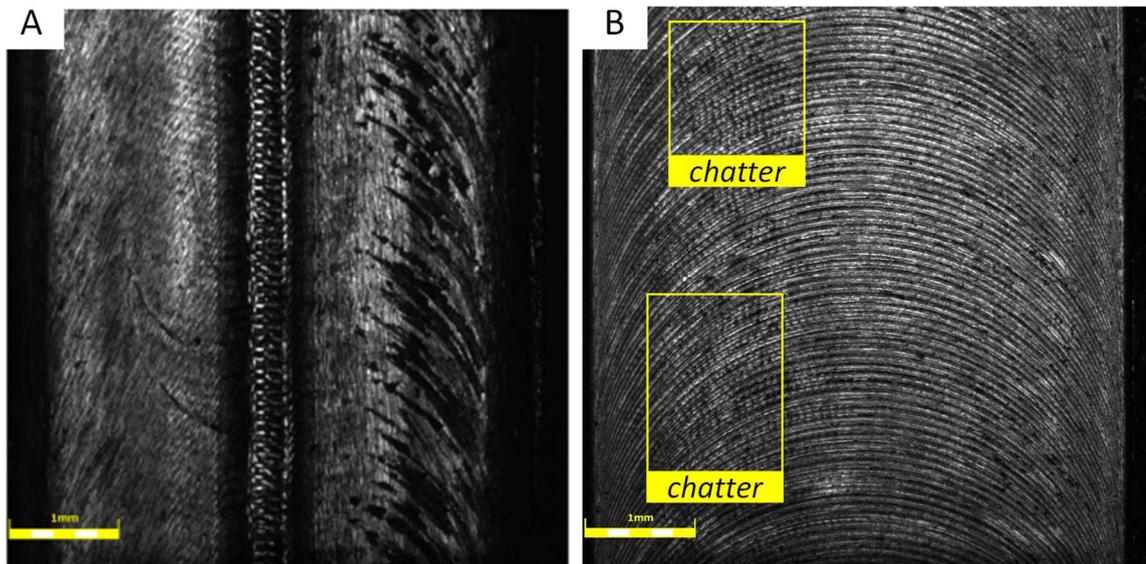


Figura 77: a) Canal concordante e discordante do autor Avila (2022). b) Canal Pe3.

Na Figura 83 temos uma microfotográfica de várias partes do canal Pa3, onde consegue-se analisar a parte inicial do canal (Figura 83A), parte central (83B) e a parte final do canal (83C).

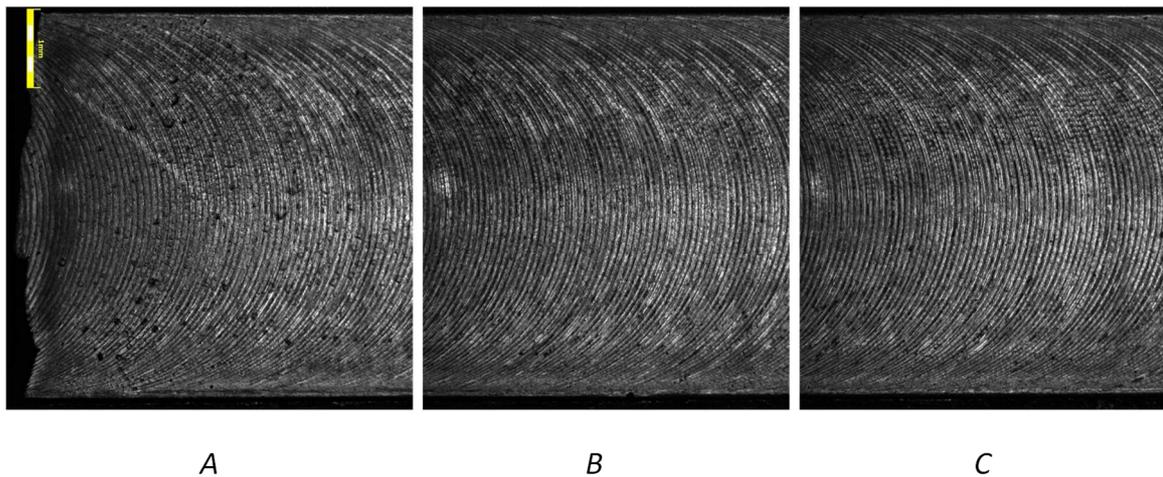


Figura 78: Diferentes partes do canal Pa1 a) início. b) meio. c) final.

Na parte inicial do canal Pa3, é possível observar vários defeitos com grandes magnitudes, os quais não são tão evidentes quando comparados com as partes finais do mesmo canal. Algumas dessas imperfeições são destacadas na Figura 84. Considerando o fato desses defeitos estarem mais evidente no início do canal (borda da peça depositada), pode-se levantar como hipótese uma correlação entre o início da deposição e a maior presença de descontinuidades/defeitos, assim, esses possivelmente não são provenientes do processo de usinagem, e sim de sua deposição.

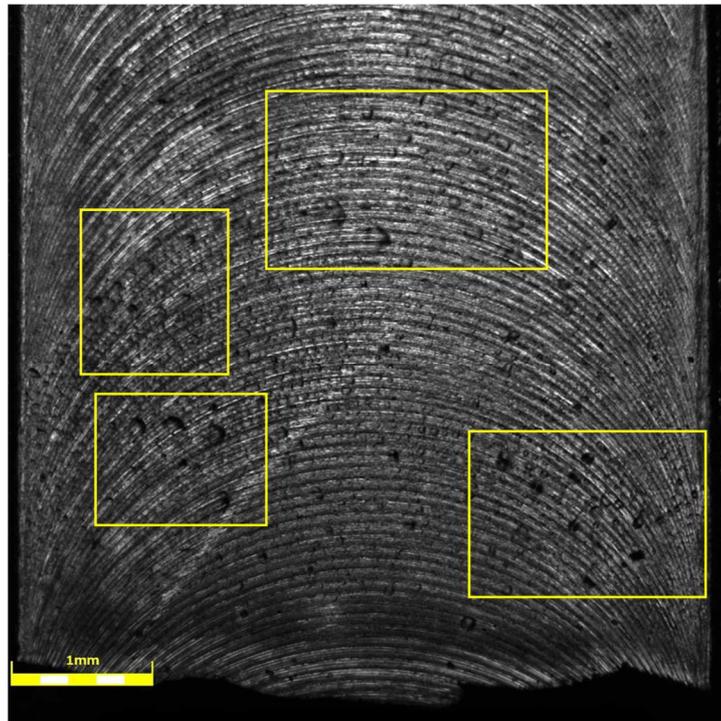


Figura 79: Imperfeições no início do canal Pa3.

Ao examinar os Canais 4, podemos observar uma clara diferença nas integridades superficiais resultantes do fresamento nas direções paralela e perpendicular à deposição. Ao analisar a Figura 85A, notamos o canal fresado a uma velocidade de corte de 40 m/min no sentido perpendicular (Pe4), apresentando marcas de avanço muito intensas e diversas imperfeições. Essa situação se inverte ao considerar o canal Pa4, onde ainda são visíveis alguns poros, mas a superfície exhibe menos defeitos.

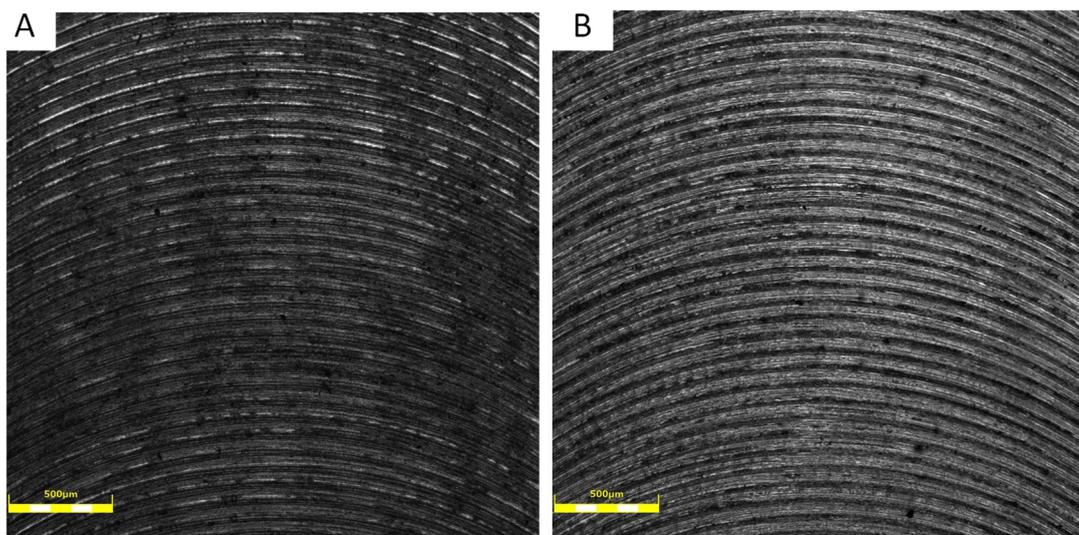


Figura 80: Canais 4 fresados com $V_c = 40$ m/min. a) canal Pe4. b) Canal Pa4.

Na Figura 86, podemos discernir de maneira mais nítida as diferenças entre os Canais 4. No caso do canal perpendicular (Pe4), representado pelas figuras da primeira linha, observamos defeitos e manchas, fazendo as marcas de avanço não serem perceptíveis. Em comparação, o canal paralelo (Pa4) exibe uma notável diferença, apresentando uma superfície mais uniforme, com poucos defeitos. Assim, conseguimos visualizar claramente as marcas de avanço em nossa figura, nas imagens da segunda linha.

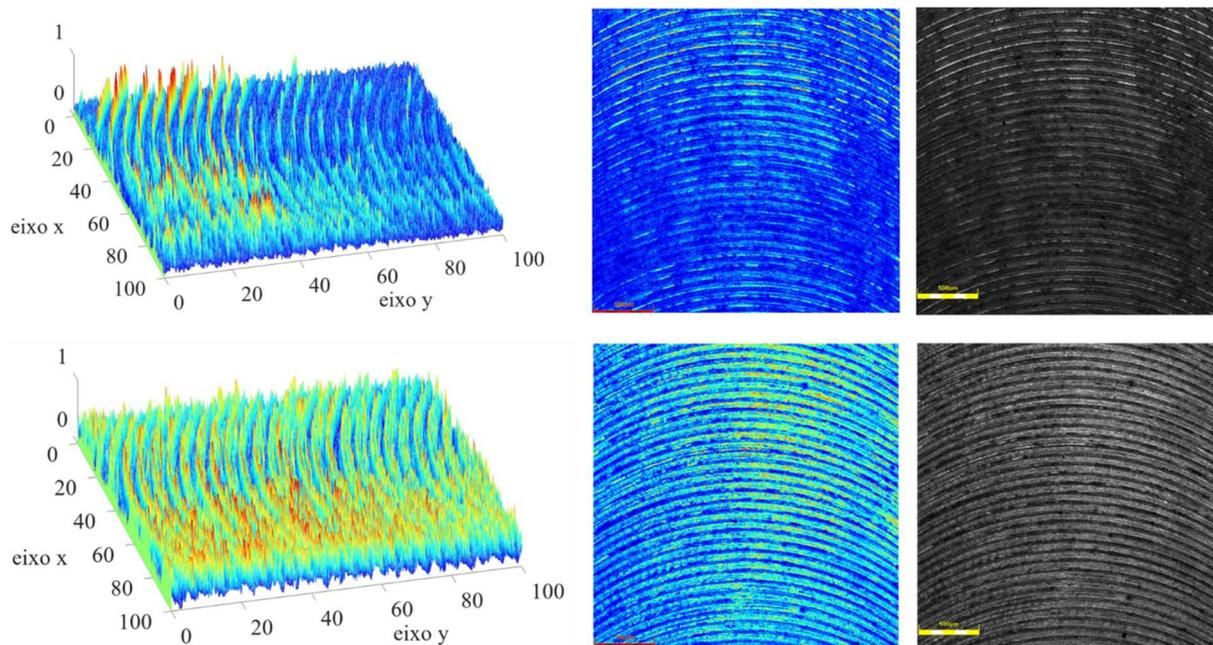


Figura 81: Comparativo entre os canais Pe4 e Pa4.

4.3.1 Análise da Ferramenta de Corte

Ressalta-se que não foi objetivo do trabalho avaliar o desgaste da ferramenta, porém após a realização dos ensaios a ferramenta foi avaliada. Foi observado que após os 8 ensaios com diferentes velocidades de corte e direções de usinagem a ferramenta de metal duro com revestimento em Nitreto de Titânio Alumínio não apresentou grande desgaste, avaliação qualitativa. Na Figura 87 é possível analisar a ponta de corte da ferramenta, na imagem com uma escala de $500 \mu\text{m}$ poucos sinais de desgaste na ferramenta podem ser observados.

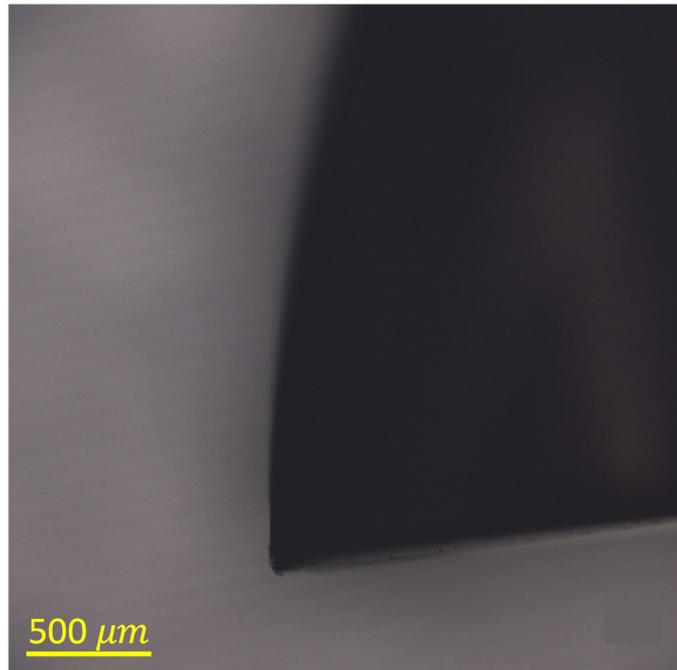


Figura 82: Ponto de corte da ferramenta depois de todos os ensaios.

Nas Figuras 88A e 88B, é visível a aresta de corte da ferramenta, juntamente com alguns cavacos que permaneceram aderidos após as operações de usinagem. Pode-se notar um leve desgaste nas imagens, onde é perceptível que parte do revestimento já se desprende da ferramenta, especialmente em sua ponta. Assim, sugere-se que em estudos futuros o desgaste da ferramenta seja avaliado de forma quantitativa.

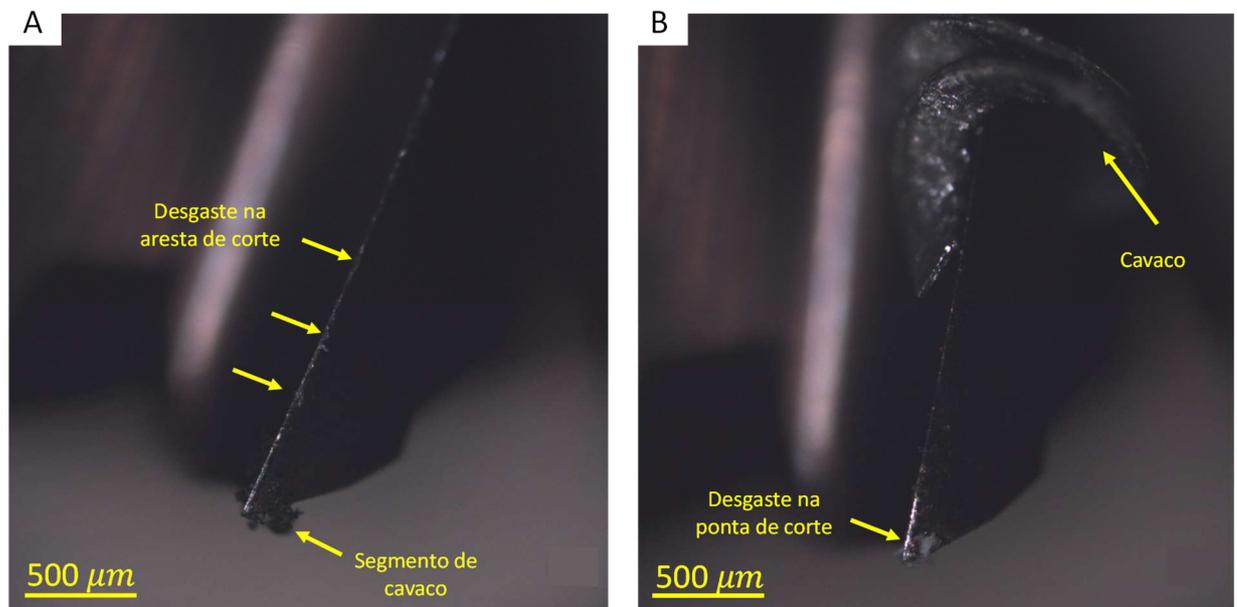


Figura 83: Desgaste da ferramenta de diferentes ângulos.

5 CONCLUSÕES

Após a realização do estudo teórico e dos ensaios de fresamento de peças de ER70S-6 produzidas por MADA, com ferramenta de metal duro revestida (Ti, Al)N utilizando fluido de corte e avaliação das variáveis de saída como rugosidade, dureza e análise superficial, concluiu-se os seguintes pontos:

- i.** O fresamento em ambas as direções, é um processo altamente eficaz para usinagem deste tipo de peça, gerando poucas rebarbas e possibilitando a redução da rugosidade média de superfícies de peças fabricadas por manufatura aditiva, alcançando, melhorias de até 95% para a condição paralela e atingindo 82% de redução na rugosidade com o fresamento perpendicular;
- ii.** Para rugosidades Ra, o fresamento no sentido paralelo à deposição apresenta menores valores de rugosidade, superando o sentido perpendicular em no mínimo cerca de 60% ao usinar com os mesmos parâmetros de corte;
- iii.** Rugosidade Rz demonstra uma inversão de valores ao comparar as duas direções. Em fresamentos perpendiculares, maiores Rz são observados em baixas velocidades de corte, enquanto na direção paralela, as maiores velocidades resultam em valores mais altos de Rz;
- iv.** No que diz respeito às rugosidades Rz, fresamentos na direção perpendicular à deposição apresentam valores superiores, podendo atingir até 64% a mais em comparação com a direção paralela;
- v.** A velocidade de corte se mostrou um parâmetro pouco influente para a direção paralela. Já para a direção perpendicular de usinagem, as velocidades de corte mais baixas resultam em maiores valores de rugosidades;
- vi.** A dureza da peça tende a aumentar após o processo de fresamento. A variação da dureza em função da velocidade de corte, no entanto, variou: na direção perpendicular, o aumento da velocidade de corte resultou em um aumento na dureza e na paralela ocorreu o oposto.

vii. Em relação à qualidade superficial, a peça tende a obter melhores aspectos visuais para fresamentos no sentido paralelo, o que está de acordo com a avaliação do Ra. Além disso, são identificados muitos poros, independentemente da direção do processo e as partes iniciais dos canais frequentemente apresentam defeitos mais acentuados quando comparadas às regiões finais, o que indica que a maior parte das descontinuidades encontradas foi proveniente da deposição e não da usinagem.

6 REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6162:1989. Movimentos e relação geométrica na usinagem dos metais – Norma Brasileira Registrada, São Pulo, 1989, 37p.
- ABNT, A. B. N. T. NBR 4287 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. ABNT, p. 1–18, 2002.
- ADLER, D. P., Hii, W. S., Michalek, D. J., & Sutherland, J. W.. Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns. *Machining Science and technology*, v. 10, n. 1, p. 23-58, 2006.
- AHMED, Yassmin Seid; VELDHUIS, Stephen Clarence. Effects of High pressure coolant on machining temperature and machinability of AISI 304 stainless steel. In: *The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*. 2018.
- ALBERTI, Eduardo André; SILVA, Leandro João da; D'OLIVEIRA, Ana Sofia. Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. *Soldagem & Inspeção*, v. 19, p. 190-198, 2014.
- AL-ZUBAIDI, Salah; GHANI, Jaharah A.; CHE HARON, Che Hassan. Application of ANN in milling process: a review. *Modelling and Simulation in Engineering*, v. 2011, 2011.
- AMN, A. M. d. N. NBR NM 315 - Ensaio não destrutivo - Ensaio Visual - Requisitos e práticas recomendadas. AMN, p. 1–11, 2017.
- AMORIM, Heraldo José de. Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro. 2002.
- AMORIM, Heraldo José de. Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro. 2002.
- AMPOWER, 2019. Technology overview metal Additive Manufacturing
- ARRAZOLA, P. J., Özel, T., Umbrello, D., Davies, M., & Jawahir, I. S. Recent advances in modelling of metal machining processes. *Cirp Annals*, v. 62, n. 2, p. 695-718, 2013.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018 Manufatura Aditiva Princípios Gerais Terminologia. ABNT/CEE-261 Manufatura Aditiva, Rio de Janeiro RJ, Brasil, 2018.
- AURICH, Jan C. et al. Burrs—Analysis, control and removal. CIRP annals, v. 58, n. 2, p. 519-542, 2009.
- ÁVILA, Carlos Toshio Araki, DE OLIVEIRA, Déborah. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DE CANAIS EM PEÇA DE ER70S-6 OBTIDA POR MADA. 2023
- ÁVILA, Carlos Toshio Araki. Estudo da usinagem de peças impressas por manufatura aditiva a arco, com foco no acabamento. 2022.
- AVILA, R. F.; ABRAO, A. M. The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel. Journal of Materials Processing Technology, v. 119, n. 1-3, p. 21-26, 2001.
- BANIN JÚNIOR, J. R. Análise de tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento do topo de aço SAE 4340 endurecido. 2009.
- BARBOSA, Patrícia Alves et al. Furação de ferros fundidos austemperados e nodular perlítico. 2009.
- BARRETO, Thalia de Souza Menna. Estudo das características de usinagem de peças metálicas obtidas por manufatura aditiva a arco. 2022.
- BEZERRA, Diego Carreras; MACHADO, Izabel Fernanda. Avaliação da Usinabilidade em torneamento de aço ABNT 1045 para diferentes velocidades de corte e ferramentas. Universidade de São Paulo, p. 3-10, 2008.
- BILLY W. et al. The value of additive manufacturing: future opportunities. Briefing paper N2, Technical Report, Institute for Molecular Science and Engineering, Imperial College London, September, 2017.
- BOOGERT, M.; KALS, H.; van HOUTEN M. Toll Paths and Cutting Technologies in Computer-Aided Process Planning. International Journal Advanced Manufacturing Technology, n.11, p. 186-197, 1996.
- BORGES, Joel Brasil. Módulo III: Usinagem Básica. Araranguá:[sn], 2009.
- BRAMM, U. First ever 3D printed primary flight control component from Liebherr – Aerospace Flownon an Airbus Aircraft. [S. l.], 2017.
- BYERS, J P Metal working fluids, first edition, 1994 (CRC, USA).
- CALLISTER JR., W. D. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Abordagem Integrada. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006. 702 p.

- CAMACHO, J. H. Frästechnologie für Funktionsflächen im Formenbau. Hannover, 1991. 174 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universität Hannover, 1991.
- CAMPBELL, Ian et al. Wohlers report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report. 2018.
- CHILDS, Thomas HC et al. Metal machining: theory and applications. Butterworth-Heinemann, 2000.
- CIMM. Material Didático sobre Usinagem. 2014. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/materialdidatico/usinagem.shtml>>. Acesso em: 07 set. 2023.
- COELHO, REGINALDO T.; DA SILVA, ERALDO JANONNE. INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE FRESAMENTO. 2018.
- COOK, N. H.; FINNIE, Iain; SHAW, M. C. Discontinuous chip formation. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, v. 76, n. 2, p. 153-162, 1954.
- COPPINI, Nivaldo Lemos; BAPTISTA, Elesandro Antonio. Alternativas de otimização dos parâmetros de corte para cenários de fabricação em usinagem. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, v. 18, 1998.
- COROMANT, Sandivk. Catálogo principal. AB Sandvik Coromant, Sandviken, p. A424-A433, 2009.
- COSTA, E. S.; SANTOS, Denis Júnio. Disciplina: Processo de Usinagem. Divinópolis, MG, p. 6, 2006.
- COTTELEER, Mark; JOYCE, Jim. 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth. Deloitte Review, v. 14, n. 1, p. 3-19, 2014.
- DAS, Bappa; PANDA, Biranchi N.; DIXIT, Uday S. Microstructure and mechanical properties of ER70S-6 alloy cladding on aluminum using a cold metal transfer process. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 31, n. 11, p. 9385-9398, 2022.
- DAS, Sudhansu Ranjan; DHUPAL, Debabrata; KUMAR, Amaresh. Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool. Measurement, v. 62, p. 108-126, 2015.
- DASS, Adrita; MORIDI, Atieh. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. Coatings, v. 9, n. 7, p. 418, 2019.
- DE ASSIS, C. L. F., Bazanini, N. C., de Queiroz, M. C. G. P., Rodrigues, A. R., Gallego, J., & da Silva Neto, O. V. (2010). Efeito do fresamento na microestrutura e na formação do cavaco de aços ferríticos com grãos ultrafinos. *VI Usinagem*.

- DE CHIFFRE, Leonardo. Function of cutting fluids in machining. *Lubrication Engineering*, v. 44, n. 6, p. 514-518, 1988.
- DE MORAES, Daniel. Uma contribuição ao fresamento frontal de superfícies irregulares em blocos de motores em Ferro Fundido Cinzento. Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Campinas, Brasil, p. 134, 2011.
- DEBROY, T.; WEI, H.; ZUBACK, J.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J.; MILEWSKI, J.; BEESE, A.; WILSON-HEID, A.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, vol. 92, p. pp. 112–224., 03 2018.
- DEBROY, Tarasankar et al. Additive manufacturing of metallic components–process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, v. 92, p. 112-224, 2018.
- DECAPAGGIO, STAMPA 3D: METALLI, DECAPAGGIO E PASSIVAZIONE. 2020. Data de acesso: 22/12/2023. Disponível em: <https://decapaggio-passivazione.it/stampa-3d-metalli-decapaggio-e-passivazione>.
- DINIZ, Anselmo E.; MARCONDES, Francisco C.; COPPINI, Nivaldo L. Tecnologia da usinagem dos materiais. 7ª edição, São Paulo: ed. Artliber, 2010.
- DINIZ, Anselmo Eduardo; MACHADO, Álisson Rocha; CORRÊA, Janaina Geilser. Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, p. 3157-3168, 2016.
- DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. 2006.
- EL-SONBATY, I.; KHASHABA, U. A.; MACHALY, T. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. *Composite structures*, v. 63, n. 3-4, p. 329-338, 2004.
- FERRARESI, Dino. Fundamentos da usinagem dos metais. Editora blucher, 2018.
- FERRARESI, Dino; PALLEROSI, Carlos Amadeu; RUFFINO, Rosalvo Tiago. Fresamento. 1970.
- FRAZIER, William E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, v. 23, p. 1917-1928, 2014.
- GIBSON, Ian et al. Direct digital manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, p. 378-399, 2010.
- GOMES, João Francisco Bueno; WILTGEN, Filipe. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. *Revista Tecnologia*, v. 41, n. 1, 2020.

- GONZÁLEZ, Ricardo VB. Rugosidade superficial: uma abordagem prática. São Paulo: Mitutoyo, 1998.
- GROOVER, Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. John Wiley & Sons, 2020.
- HERZOG, Dirk et al. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, v. 117, p. 371-392, 2016.
- JAFARI, Davoud; VANEKER, Tom HJ; GIBSON, Ian. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, v. 202, p. 109471, 2021.
- JASPERS, S. P. F. C.; DAUTZENBERG, J. H. Material behaviour in metal cutting: strains, strain rates and temperatures in chip formation. *Journal of materials processing technology*, v. 121, n. 1, p. 123-135, 2002.
- JUNEJA, B.L.; SWKHON, G.S. “Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools”, John Wiley & Sons, New Delhi, India, 1987, 462 pags., ISBN 0-470- 20860-0.
- KALADHAR, M. Optimization of machining parameters when machining beyond recommended cutting speed. *World Journal of Engineering*, v. 17, n. 5, p. 739-749, 2020.
- KAZMAIER, J; ARTELSMAIR, J. Parameter education CMT RCU5000i background parameter for algorithms starting at version 2.3.7. p. 24, 2007.
- KLINE, W. A.; DeVOR, R. E ; SHAREEF, I. A. The Prediction of Surface Accuracy in End Milling. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, v. 104, n. 3, p. 272-278, ago. 1982.
- KOEPFER, C. Tool System Considerations for High Speed Machining. *Modern Machine Shop*, p. 84-89, agosto 1997.
- KOMANDURI, R.; VON TURKOVICH, B. F. New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys. *Wear*, v. 69, n. 2, p. 179-188, 1981.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F. *Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. 6. Auflage. Berlin : Springer - Verlag, 471 p. 1999.
- KOVALENKO, Oksana et al. Avaliação de aspectos da estabilidade do arco e da geometria de pré-formas em manufatura aditiva utilizando o processo MIG/MAG CMT com foco na liga Ti-6Al-4V. 2019.
- LAUE, Robert et al. Study on the Milling of Additive Manufactured Components. *Metals*, v. 12, n. 7, p. 1167, 2022

- LEE, Seung Hwan. Optimization of cold metal transfer-based wire arc additive manufacturing processes using gaussian process regression. *Metals*, v. 10, n. 4, p. 461, 2020.
- LINCOLN ELETRIC. CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM. Disponível em: <https://inspecaosoldagem.files.wordpress.com/2011/08/apostila-consumc3adveis-de-soldagem.pdf>. Acesso em: 12 de jun. 2023.
- 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*, v. 59, p. 739–749, 2020.
- MACHADO, Álisson Rocha et al. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher, 2015.
- MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; DA SILVA, Márcio Bacci. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher, 2009.
- MACHADO, Álisson Rocha; SILVA, Marcio Bacci da. Usinagem dos metais. Metal Cutting), Technical Notes, 9th version,[In Portuguese], 2004.
- MARCELINO, Ademir P. et al. Medição e simulação dos esforços de usinagem no fresamento de topo reto de ligas de alumínio tratável termicamente 6061. In: Congresso estudantil de engenharia mecânica-CREEM. 2004. p. 2004.
- MERGULHÃO, Marcello Vertamatti. Fusão em leito de pó a laser da liga de Co-Cr-Mo: propriedades mecânicas e microestrutura após tratamentos térmicos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2022.
- MIRRES, S. P.; ARAUJO, A. C.; AGUIAR, R. A. A. Análise de diferentes sinais experimentais durante chatter no fresamento de topo. Uberlândia, p. 1–11, 2014.
- MITUTOYO, Medidor de Rugosidade Superficial Modelo SJ-210. Data de acesso: 18/06/2023. Disponível em: [BA138114_99MBB122P1_SJ-210.pdf](#)
- Modern Machine Shop, Lower Buy-to-Fly Ratios with Near-Net Additive Manufacturing. 2019. Disponível em: [Lower Buy-to-Fly Ratios with Near-Net Additive Manufacturing | Modern Machine Shop \(mmsonline.com\)](#) . Acesso em: 27 jun. 2023.
- MOREHEAD, Mason D.; HUANG, Yong; LUO, Jian. Chip morphology characterization and modeling in machining hardened 52100 steels. *Machining science and technology*, v. 11, n. 3, p. 335-354, 2007.

- MUVUNZI, Rumbidzai et al. Analysis of potential materials for local production of a rail car component using additive manufacturing. *Heliyon*, v. 8, n. 5, p. e09405, 2022.
- NEMANI, A. V.; GHAFFARI, 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.
- NOVELINO, A. L. B. Estudo da geometria dos cordões fabricados por manufatura aditiva metálica por arco elétrico e arame consumível. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p., 2021.
- OLIVEIRA, Catarina Claudino Fernandes de. Análise da microestrutura de peças impressas de arame ER70S-6 obtidas através de manufatura aditiva por deposição a arco via processo GMAW-CMT. 2022.
- OLYMPUS, Bringing Answers to the Surface. 2013. Data de acesso: 18/06/2023. Disponível em: [OLS4100 .pdf \(techsansystem.co.kr\)](https://www.techsansystem.co.kr/OLS4100.pdf)
- PASKO, Rafal; PRZYBYLSKI, Lucjan; SLODKI, Bogdan. High speed machining (HSM)–the effective way of modern cutting. In: International workshop CA systems and technologies. 2002. p. 72-79.
- POLAK, V. Y.; DOSTAL, P. Analysis of modern methods in welding technology of technical materials. MENDELNET; Czech Republic, 2013.
- POLLI, Milton Luiz. Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte. 2005.
- RECHT, R. F. Catastrophic thermoplastic shear. *Trans ASME, Journal Applied Mechanics*, 1964.
- RIBEIRO, Guilherme Menezes, GONCALES, Marcos Vinicius, DE OLIVEIRA, Déborah. INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DO POSICIONAMENTO DO BOCAL DO FLUIDO DE CORTE NO FRESAMENTO DE PEÇAS DE ER70S-6 OBTIDAS POR MADA. 2023
- SALES, Wisley Falco et al. Relação experimental entre o raio de curvatura natural do cavaco e os principais parâmetros de usinagem. 1999.
- SARKER, Dyuti et al. Metal additive manufacturing. 2021.
- SARVANKAR, Shruti Ganesh; YEWALE, Sanket Nandaram. Additive manufacturing in automobile industry. *Int. J. Res. Aeronaut. Mech. Eng*, v. 7, n. 4, p. 1-10, 2019.
- SCHAFER, F. Product design influences on deburring. Technical paper, p. 12, 1975.

- SCHULZ, Herbert. The history of high-speed machining. *Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 7, n. 13, p. 9-18, 1999.
- SCHWERD, F., *Spanend Werkzeugmaschinen*. Berlin – 1956.
- SEG, I. d. M. Locação de rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201. 2022. Data de acesso: 18/06/2023. Disponível em: <https://www.seginstrumentos.com.br/locacao/locacao-de-rugosimetro-mitutoyo-modelo-sj-201>
- SHAW, Milton Clayton; COOKSON, J. O. *Metal cutting principles*. New York: Oxford university press, 2005.
- SIBEL, E. *Handbuch der Werkstoffprüfung*, Berlin -1955.
- SILVA, Pedro Coelho et al. Manufatura aditiva: Revisão sistemática da literatura. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 11, p. 84502-84515, 2020.
- SILVA, Rodrigo Henriques Lopes et al. Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais. 2010.
- SOUZA, André João de. *Processos de fabricação por usinagem*. Universidade Federal do Rio Grande, 2011.
- STEMMER, C. E. *Ferramentas de Corte 2*. Florianópolis: UFSC, 1992
- STN ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools, 1993
- SURYAKUMAR, S.; KARUNAKARAN, K.; BERNARD, A.; CHANDRASEKHAR, U.; RAGHAVENDER, N. D. S. Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, v. 33, p. 331–344, 2011.
- THOMAS-SEALE, Lauren EJ et al. The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry. *International Journal of Production Economics*, v. 198, p. 104-118, 2018.
- TODHUNTER, L.; LEACH, R.; LAWES, S.; BLATEYRON, F. Industrial survey of iso surface texture parameters. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 18, p. 84–92, 06 2017.
- Toyserkani, E., Dyuti, S., Ibhádode, O.O., Liravi, F., Russo, P., Taherkhani, K., 2022. *70 Metal additive manufacturing*, 1st ed. Wiley, NJ.
- TRENT, E. M. *Metal cutting*. 2. ed. Londres: Butterworths & Co., 1985.
- TRUNG, D. D. Influence of cutting parameters on surface roughness during milling AISI 1045 steel. *Tribology in Industry*, v. 42, n. 4, p. 658, 2020.

- VENTURA, Carlos Eiji Hirata; HASSUI, Amauri. Análise da relação entre a formação do cavaco, vibração da ferramenta e desvio de forma no processo de torneamento. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 76, 2008.
- VIEIRA, J. M.; MACHADO, A. R.; EZUGWU, E. O. Performance of cutting fluids during face milling of steels. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 116, n. 2-3, p. 244-251, 2001.
- WECK, M. *Werkzeugmaschinen - Fertigungssysteme, Band 4: Meßtechnische Untersuchung und Beurteilung*. 5. Auflage. Düsseldorf : VDI - Verlag, p. 213-367, 1996.
- YASIR, Muhammad et al. Effect of cutting speed and feed rate on surface roughness of AISI 316L SS using end-milling. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 11, n. 4, p. 2496-2500, 2016.
- YG-1 CO.,LTD. TiAlN-COATED SOLID CARBIDE END MILLS, 2023. Disponível em: [YE-K2 20 K-2 CARBIDE END MILLS.pdf](#) . South Korea. 49 p. Acesso em: 13 de jun.2023.
- YUSUP, Norfadzlan; ZAIN, Azlan Mohd; HASHIM, Siti Zaiton Mohd. Overview of PSO for optimizing process parameters of machining. *Procedia Engineering*, v. 29, p. 914-923, 2012.
- ZACCARON, Everaldo. ANALISE COMPARATIVA ENTRE ARAMES DE SOLDADA DA CLASSE ER70S-6 NO PROCESSO GMAW COM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO. *Ciência dos materiais, Projetos Mecânicos*, 2018.
- ZELI, W. A. N. G.; ZHANG, Yuanbin. A review of aluminum alloy fabricated by different processes of wire arc additive manufacturing. *Materials Science*, v. 27, n. 1, p. 18-26, 2021.
- ZOCCA, Andrea et al. Challenges in the technology development for additive manufacturing in space. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, v. 1, n. 1, p. 100018, 2022.
- ZWICK ROELL, ZHU250 para o ensaio de dureza universal, 2023. Disponível em: [ZHU250 para o ensaio de dureza universal | ZwickRoell](#) . Acesso em: 18/06/2023.

7.1 Especificações da ferramenta de corte



TiAIN-COATED SOLID CARBIDE END MILLS
4 FLUTE SHORT LENGTH

G9A69 PLAIN SHANK

► Suitable for dry milling applications at high temperatures.
 ► Excellent high-performance end mills.
 ► 4 flute allows for better work piece finishes.




CARBIDE

4

30°

DIN
6535HA

P.68

Unit : mm

EDP No.	Mill Diameter	Shank Diameter	Length of Cut	Overall Length
G9A69010	1.0	3	3	39
G9A69015	1.5	3	5	39
G9A69020	2.0	3	7	39
G9A69025	2.5	3	7	39
G9A69030	3.0	3	10	39
G9A69040	4.0	4	14	51
G9A69050	5.0	5	16	51
G9A69060	6.0	6	19	64
G9A69080	8.0	8	21	64
G9A69100	10.0	10	22	70
G9A69120	12.0	12	25	76
G9A69160	16.0	16	32	89
G9A69200	20.0	20	38	102

Mill Dia. Tolerance (mm)	Shank Dia. Tolerance
0 ~ - 0.03	h5

7.2 Especificação do 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 CO ₂ 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, S235JO-S355JO, 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 _e	Tensile strength R _m	Elongation A (L _g =5d _g)	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 C1	0.8	
			0.9	
			1.0	
			1.2 1.6	
Approvals				
TÜV (13009), DB (42.236.01), ABS, CWB, CE				

7.3 Especificação da 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:	
<ul style="list-style-type: none"> - Fanuc Oi Mate-MD - Spanner - Wrench - Adjusting Screw - Sizing block 	
OPTIONAL ACCESSORIES	
<ul style="list-style-type: none"> - Siemens 02C or KND 1000I CNC system - Assemble A axis 	
	

7.4 Especificação do fluido 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, apalinar, 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 ERevisão 07
Data: 13/07/2017