



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**Fresamento de Peças de ER70S-6 Obtidas por
Manufatura Aditiva com Diferentes Atmosferas
Lubri-Refrigerantes**

Por

Marcos Vinícius Gonçalves

Brasília-DF, 25 de julho de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Fresamento de de peças de ER70S-6 obtidas por manufatura aditiva com diferentes atmosferas lubri-refrigerantes

Por

Marcos Vinícius Gonçalves

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

Banca Examinadora

Profa. Dra. Déborah De Oliveira, UnB/ENM (Orientadora)
Prof. Dr. Maksym Ziberov, UnB/ENM
Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha, UFG/EMC

Brasília-DF, 25 de julho de 2023

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família, em especial meus pais, Marco Gonçalves e Elizângela Gonçalves, ao meu irmão Luiz Gonçalves e a minha companheira Flávia Accarini que são meus pilares e me fortaleceram todos os dias durante essa minha caminhada.

Agradeço também a Universidade de Brasília, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica - ENM, por me proporcionar desafios extremamente complexos e ao mesmo tempo maravilhosos com profissionais de extrema qualidade e pessoas que guardo no meu coração.

Também não posso deixar de agradecer aos meus colegas da faculdade que passaram junto comigo pelo período mais intenso desses anos 2020 à 2022 e estão comigo nessa jornada pra nos tornarmos engenheiros mecânico.

E por fim, deixo o meu agradecimento para minha professora e orientadora Déborah de Oliveira a qual abriu portas para que meu estudo fosse capaz de ser desenvolvido e compartilhou comigo diversos ensinamentos que guardo para sempre.

A todos que passaram pela minha vida nessa jornada longa e árdua saibam que eu os agradeço do fundo do meu coração.

Resumo

A usinagem é um processo mecânico que remove material de uma matéria prima, na forma de cavaco, com finalidade de obter um produto final com uma forma específica. Então trata-se de um processo que necessita de contato direto entre peça e ferramenta, isso ocasiona forças opostas ao processo, como o atrito entre as partes e por consequência gera calor durante todo o processo acarretando em diversos problemas, como defeitos superficiais, danos térmicos, perda de eficiência, entre outros. Tendo em vista que o setor da usinagem esta presente nos mais variados ramos da economia, o mesmo passa por constante modificações para tentar sempre conseguir um ganho na produtividade, dessas mudanças surgem variações de ferramentas, máquinas, materiais, fluidos de corte. Fluidos de corte em geral possuem duas funções para o processo, podendo ser direcionado mais especificadamente para uma das funções, refrigerar o processo e/ ou lubrificá-lo. A aplicação deste insumo no processo visa justamente amenizar a perda de eficiência do mesmo para o atrito e/ ou temperatura, além de propiciar melhores acabamentos e maior qualidade das peças usinadas. Quando se estuda um processo que demanda etapas de pós processamento, como é o caso da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), faz-se necessário entender bem qual é o resultado do emprego de diferentes atmosferas lubri-refrigerantes, justamente para que consiga retirar do seu processo o produto com melhor qualidade micro e macroscópica com o menor gasto possível. Neste trabalho estudou-se os efeitos gerados sobre uma peça confeccionada por MADA a base de arame ER70S-6 pelo fresamento de topo com diferentes atmosferas lubri-refrigerantes atuando sobre o processo. Os resultados deste trabalho demonstraram que a atmosfera que obteve melhores resultados após o processo de fresamento foi a junção da injeção de fluido lubri-refrigerante com uma vazão de 20 l/min com o ar comprimido, esta por sua vez registrou as melhores rugosidades entre todas as atmosferas sugeridas como $R_a = 0,42$, $R_q = 0,52$ e $R_z = 2,60$, além de não possuir falhas na superfície dos canais e ter tido a maior dureza, registrando 132,16 HB, apenas 5% de redução da dureza da superfície da peça. Como esperado pela literatura os canais com usinagem a seco registraram os piores acabamentos e uma grande presença de defeitos sobre a superfície, ocorrendo bastante efeito plowing sobre o canal.

Palavras-chaves: Manufatura Aditiva, Atmosferas lubri-refrigerantes, Fluido de corte, Acabamento superficial, Dureza, Rugosidade.

Abstract

Machining is a mechanical process that removes material from a raw material, in the form of a chip, in order to obtain a final product with a specific shape. So it is a process that requires direct contact between part and tool, this causes forces opposite to the process, such as friction between the parts and consequently generates heat throughout the process causing several problems, such as surface defects, thermal damage, loss of efficiency, among others. Considering that the machining sector is present in the most varied branches of the economy, it undergoes constant modifications to always try to achieve a gain in productivity, these changes arise variations of tools, machines, materials, cutting fluids. Cutting fluids in general have two functions for the process, and can be directed more specifically to one of the functions, cooling the process and / or lubricating it. The application of this input in the process aims precisely to mitigate the loss of efficiency for friction and / or temperature, in addition to providing better finishes and higher quality of the machined parts. When studying a process that requires post-processing steps, as is the case of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), it is necessary to understand well what is the result of the use of different lubricating-cooling atmospheres, precisely so that you can remove from your process the product with the best micro and macroscopic quality with the lowest possible expense. In this work the effects generated on a part made by WAAM based on ER70S-6 wire by end milling with different lubricant-coolant atmospheres acting on the process were studied. The results of this work showed that the atmosphere that obtained the best results after the milling process was the junction of the injection of lubricant-coolant fluid with a flow rate of 20 l/min with compressed air, This in turn recorded the best roughness among all the suggested atmospheres as $R_a = 0.42$, $R_q = 0.52$ and $R_z = 2.60$, in addition to having no flaws on the surface of the channels and having had the highest hardness, registering 132.16 HB, only 5% reduction in the hardness of the surface of the part. As expected by the literature, the dry machined grooves recorded the worst finishes and a large presence of defects on the surface, with a lot of plowing effect on the groove.

Key-words: Additive Manufacturing, Cutting Fluid, Cooling-lubricant atmosphere, Nozzle Positioning, Surface Finish, Hardness, Roughness.

Lista de Figuras

Figura 1 – Diagrama esquemático do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. Adaptado de (GE et al., 2018).	1
Figura 2 – Demonstração da qualidade superficial de uma peça confeccionada por MADA. Adaptado de (LUMINOSO, 2022).	2
Figura 3 – Fresamento Tangencial ou Periférico (STEMMER, 1993).	5
Figura 4 – Fresamento Frontal ou de Topo (STEMMER, 1993).	5
Figura 5 – Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento discordante NBR 6162 (ABNT, 1989).	7
Figura 6 – Representações da ferramenta de corte, (a) Penetração da ferramenta e da aresta de corte, no fresamento tangencial e (b) Profundidade de usinagem, penetração de trabalho e penetração de avanço no fresamento de topo. Adaptado de NBR 6162 (ABNT, 1989).	8
Figura 7 – Decomposição das forças de corte no fresamento. Adaptado de (MIT-SUBISHI, 2012).	9
Figura 8 – Fatores de influência sobre a força de usinagem (MACEDO, 2001). . .	10
Figura 9 – Decomposição das forças presentes na usinagem NBR 12545 (ABNT, 1991).	11
Figura 10 – Tabela de temperaturas críticas para diferentes materiais de ferramenta (a), distribuição típica de temperaturas na região de corte (b) e a distribuição de calor na região de corte (c). Adaptado de (CIMM, 2010). . .	12
Figura 11 – Jorro a baixa pressão de fluido em fresamento (FLUVISERRA, 2022). .	15
Figura 12 – Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) em fresamento (CADIUM, 2022).	16
Figura 13 – Representação do processo MADA (ALBERTI; BUENO; D’OLIVEIRA, 2015).	17
Figura 14 – Após a deposição - espessura média de 20mm e 140mm de comprimento (a), após a usinagem (b). Adaptado de (CARVALHO et al., 2020) . . .	18
Figura 15 – Após a deposição (a), peça semi-tratada (b) e peça usinada por completo (c). Adaptado de (GMBH, 2022)	19

Figura 16 – Parte do canal usinado, formado por movimentos concordantes, com defeitos visíveis. (BARRETO, 2022)	20
Figura 17 – Fluxograma da etapas do procedimento.	22
Figura 18 – Peça confeccionada com parede de 100 camadas (NOVELINO, 2021).	23
Figura 19 – Representação da peça com suas medidas.	23
Figura 20 – Peça utilizada para os testes.	23
Figura 21 – Ferramenta de corte utilizada para os testes.	24
Figura 22 – Centro de usinagem vertical - VEGA XH7132.	25
Figura 23 – A) Representação do ensaio de corte com 2 bocais, B) Representação do ensaio de corte com 1 bocal, C) Representação do ensaio de corte com 2 bocais e ar comprimido, D) Representação do ensaio de corte com ar comprimido e E) Representação do ensaio de corte seco	28
Figura 24 – Demonstração de posicionamento dos bocais durante os ensaios.	29
Figura 25 – Representação do equipamento utilizado - microscópio de medição LEXT OLS4100 (CM2P, 2022).	31
Figura 26 – Representação do equipamento utilizado - rugosímetro Mitutoyo SJ-201 (SEG, 2022).	32
Figura 27 – Representação do equipamento utilizado - durômetro Zwick Roell ZHU250 (MACHADO; MALCHER, 2022).	33
Figura 28 – Gráfico da Rugosidade Média (R_a) dos testes em comparação com a superfície.	36
Figura 29 – Gráfico da Rugosidade Média (R_a) para os canais usinados.	37
Figura 30 – Gráfico da Rugosidade Média (R_q) dos testes em comparação com a superfície.	37
Figura 31 – Gráfico da Rugosidade Média (R_q) para os canais usinados.	38
Figura 32 – Gráfico da Rugosidade Média (R_z) dos testes em comparação com a superfície.	39
Figura 33 – Gráfico da Rugosidade Média (R_z) para os canais usinados.	39
Figura 34 – Representação esquemática dos canais	41
Figura 35 – A) Imagem em 20000x de uma região arbitraria da superfície da peça, B) Imagem da réplica da superfície da peça.	41
Figura 36 – A) Imagem em 5000x do canal do primeiro teste com 2 bocais injetando fluido lubri-refrigerante, B) Imagem da réplica do primeiro teste.	42
Figura 37 – A) Imagem em 20000x do canal do primeiro teste com 2 bocais injetando fluido lubri-refrigerante, B) Imagem da réplica do primeiro teste.	43
Figura 38 – A) Imagem em 5000x do canal do segundo teste com 1 bocal injetando fluido lubri-refrigerante, B) Imagem da réplica do segundo teste.	44
Figura 39 – A) Imagem em 20000x do canal do segundo teste com 1 bocal injetando fluido lubri-refrigerante, B) Imagem da réplica do segundo teste.	44

Figura 40 – A) Imagem em 5000x do canal do terceiro teste com 2 bocais injetando fluido lubri-refrigerante e 1 injetando ar comprimido, B) Imagem da réplica do terceiro teste.	45
Figura 41 – A) Imagem em 20000x do canal do terceiro teste com 2 bocais injetando fluido lubri-refrigerante e 1 injetando ar comprimido, B) Imagem da réplica do terceiro teste.	45
Figura 42 – A) Imagem em 5000x do canal do quarto teste com ar comprimido, B) Imagem da réplica do quarto teste.	46
Figura 43 – A) Imagem em 20000x do canal do quarto teste com ar comprimido, B) Imagem da réplica do quarto teste.	47
Figura 44 – A) Imagem em 5000x do canal do quinto teste, teste a seco, B) Imagem da réplica do quinto teste.	47
Figura 45 – A) Imagem em 20000x do canal do quinto teste, teste a seco, B) Imagem da réplica do quinto teste.	48
Figura 46 – Defeito na superfície (Plowing).	48
Figura 47 – Gráfico da dureza registrada nos canais e na superfície da peça.	50
Figura 48 – Gráfico da dureza registrada apenas nos canais usinados.	50
Figura 49 – Dados ferramenta de corte (WORKFER, 2022).	60
Figura 50 – Dados ferramenta de corte (WORKFER, 2022).	61
Figura 51 – Dados sobre o material depositado para confecção da peça (BÖHLER, 2022)	62
Figura 52 – Centro de usinagem vertical - VEGA XH7132 (MADRAS, 2022)	63

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características do arame de solda ER70S-6 (WURTH, 2022).	2
Tabela 2 – Composição química do arame o ER70S-6 (BöHLER, 2022).	22
Tabela 3 – Parâmetros médios para a obtenção da peça estudada (NOVELINO, 2021).	22
Tabela 4 – Especificações da ferramentas de corte (WORKFER, 2022)	24
Tabela 5 – Especificações da máquina-ferramenta (MADRAS, 2022).	26
Tabela 6 – Parâmetros de corte (BARRETO, 2022)	27
Tabela 7 – Tabela de concentração (BIOLUB, 2022)	30
Tabela 8 – Características físico – químicas (BIOLUB, 2022)	30
Tabela 9 – Valores de rugosidade dos canais estudados	35
Tabela 10 – Valores de dureza Brinell dos canais estudados.	49

Lista de abreviaturas e siglas

<i>MA</i>	Manufatura Aditiva
<i>MADA</i>	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
<i>WAAM</i>	Wire Arc Additive Manufacturing
<i>TIG</i>	<i>Tungsten Inert Gas</i>
<i>MIG</i>	<i>Metal Inert Gas</i>
<i>MAG</i>	<i>Metal Active Gas</i>
<i>CMT</i>	<i>Cold Metal Transfer</i>
<i>GMAW</i>	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
<i>GTAW</i>	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
<i>WFS</i>	<i>Wire Feed Speed</i>
<i>TS</i>	<i>Travel Speed</i>

Lista de símbolos

f	Avanço
f_z	Avanço por Dente
d	Diâmetro da ferramenta
F_a	Força Ativa
F_{ap}	Força de Apoio
F_f	Força de Avanço
F_n	Força de Compressão
F_c	Força de Corte
F_e	Força efetiva de Corte
F_p	Força de Profundidade
F_U	Força de Usinagem
z	Número de Dentes
a_f	Penetração de Avanço
a_e	Penetração de Trabalho
a_p	Profundidade de Usinagem
R	Raio da Fresa
n	Rotação
R_a	Desvio aritmético médio
R_q	Desvio quadrático médio
R_z	Altura máxima do perfil
v_f	Velocidade de Avanço

v_c	Velocidade de Corte
v_e	Velocidade Efetiva de Corte
EP	Aditivos de extrema pressão
MQL	Mínima quantidade de lubrificante

Sumário

	1 INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos	3
	2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Fresamento	4
2.1.1	Parâmetros de corte	5
2.1.2	Forças de corte no fresamento	8
2.1.3	Temperatura no fresamento	11
2.2	Fluidos de Corte	12
2.2.1	Tipos de fluido de corte	13
2.2.2	Técnicas de aplicação de fluido de corte	15
2.3	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)	16
2.3.1	Acabamento em peças impressas por deposição a arco	18
2.3.2	Fresamento de peças impressas	19
	3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	Procedimento experimental	21
3.2	Caracterização do material	22
3.3	Ferramenta de Corte	24
3.4	Máquina-Ferramenta	25
3.5	Parâmetros de Usinagem	26
3.6	Atmosferas Lubri-refrigerantes	27
3.7	Variáveis de saída	30
3.7.1	Análise Superficial	31
3.7.2	Rugosidade	32
3.7.3	Dureza	32
	4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34

4.1	Rugosidade	34
4.2	Análise Superficial	40
4.3	Dureza	49
	5 CONCLUSÕES	52
5.1	Trabalhos futuros	53
	REFERÊNCIAS	54
	ANEXOS	59
	ANEXO A -- ESPECIFICAÇÕES DA FERRAMENTA DE CORTE	60
	ANEXO B -- ESPECIFICAÇÕES DO MATERIAL DEPOSITADO	62
	C -- ESPECIFICAÇÕES DO CENTRO DE USINAGEM VERTICAL	63

1 Introdução

1.1 Contextualização

É possível notar que o setor da usinagem possui uma relevância no ramo industrial, já que muitas peças e componentes industriais necessitam passar por processos de usinagem, sejam para reparos e/ ou até mesmo para sua confecção. Tendo em vista que esse setor sempre está em constante evolução para adaptar novas técnicas e obter melhores resultados (CRISPIM, 2022).

Outro processo de fabricação em destaque e expansão é a manufatura aditiva, sendo amplamente estudado pelas suas possibilidades de produção e economia (HACKENHAAR, 2020), sendo um processo caracterizado pelo “emprego de equipamentos capazes de fabricar objetos por meio da adição de material, camada por camada, a partir de um modelo digital tridimensional (3D)” (RODRIGUES et al., 2016), um diagrama esquemático desse processo pode ser visualizado conforme apresenta a Fig. 1.

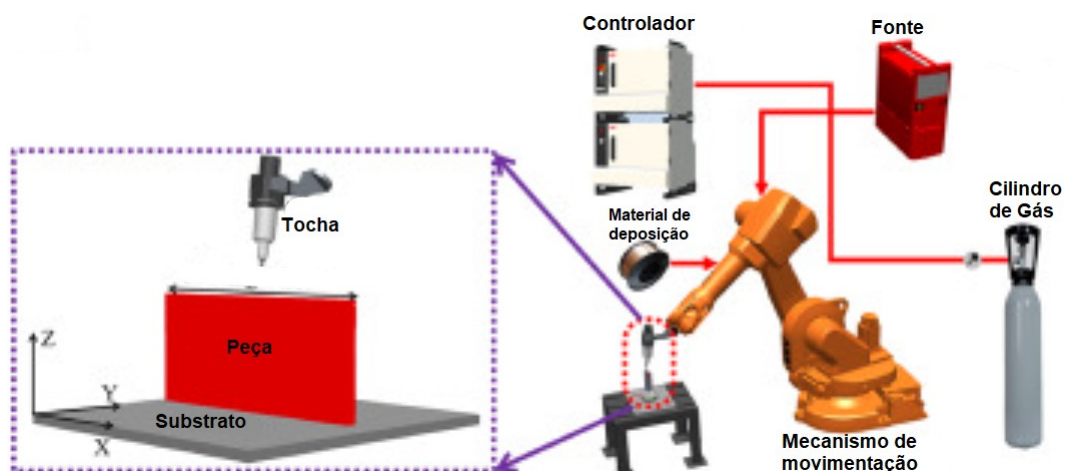


Figura 1 – Diagrama esquemático do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. Adaptado de (GE et al., 2018).

Este processo não se limita a geometrias simples e nem a pequenas dimensões, quando se trata de componentes de grandes dimensões, as taxas de deposição aplicadas no processo devem ser maiores também, isso traz para o processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) com vantagens competitivas já que o mesmo possui maior

eficiência energética e abrangente deposição de material com maior rapidez (JHAVAR; JAIN; PAUL, 2014). Porém as peças confeccionadas por esse processo possuem uma qualidade superficial relativamente baixa, quando comparado a outros processos de fabricação como fresamento, estampagem e outros. Na Fig. 2 é demonstrada uma peça confeccionada por MADA onde pode-se observar que o acabamento superficial em muitos casos necessita de etapas de pós processamento para se obter uma superfície mais homogênea.

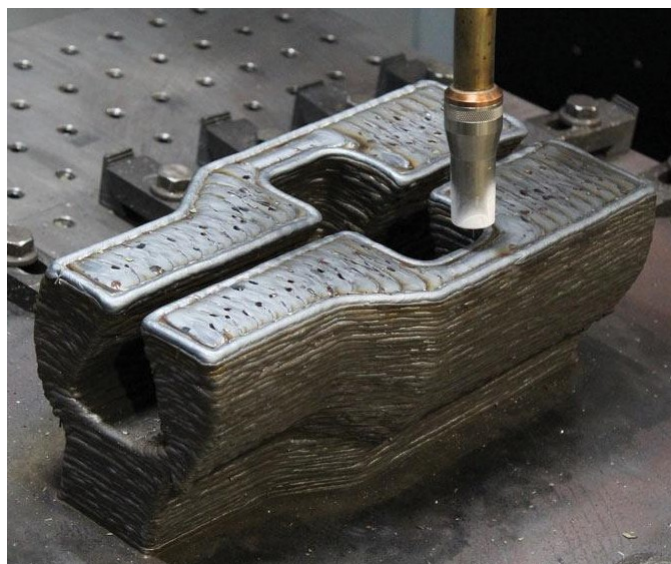


Figura 2 – Demonstração da qualidade superficial de uma peça confeccionada por MADA. Adaptado de (LUMINOSO, 2022).

Portanto na escolha do material a ser depositado deve-se levar em consideração os efeitos deste processo. Um exemplo disso está na escolha do material para a confecção da peça, um que se destaca é o ER70S-6, que é um arame de solda amplamente utilizado nos processos de soldagem MIG/MAG em máquinas semi-automáticas para a solda de aço e aço de baixa liga usualmente combinado com do gás CO_2 (100%) ou gás misto ($Ar + 8 \sim 25\% CO_2$) (WURTH, 2022). Nota-se então que, além do fato deste elemento ser aço de baixa liga e baixo carbono, o que, em teoria, o caracteriza como material de boa usinabilidade, ela tem grande uso em processos a arco elétrico e portanto excelente potencialidade para deposição e pós processamento. Suas características mecânicas estão descritas na Tab. 1.

Tabela 1 – Características do arame de solda ER70S-6 (WURTH, 2022).

Limite elástico (MPa)	420
Resistência a tração (MPa)	500
Alongamento à ruptura (L=5d)[%]	22
Resistência ao impacto (ISSO-V) [joule]	78 a -30°C

1.2 Motivação

A motivação desse trabalho se dá devido ao crescimento da utilização da manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) e sua grande necessidade de etapas de pós processamento sobre as peças confeccionadas.

De forma mais completa, nota-se que a MADA possibilita a confecção de peças com geometrias complexas e muitas vezes diminui o custo de produção de uma peça (HACKENHAAR, 2020), isso o torna um procedimento interessante, porém a qualidade superficial da peça confeccionada nem sempre é a mais desejada e isso faz com que o processo demande etapas de pós processamentos e por ser uma área relativamente nova no mercado estas etapas de pós processamento demandam estudos para melhor compreensão dos resultados esperados sobre as peças confeccionadas.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de diferentes atmosferas lubrificantes na integridade e qualidade superficial da peça usinada, por meio da coleta de parâmetros como análise superficial, dureza e rugosidade. Para isto, pretende-se realizar o fresamento de topo de uma peça confeccionada à base de arame ER70S-6.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fresamento

Segundo Stemmer (1993), entende-se fresamento como um processo de usinagem onde a remoção de material da peça se dá de modo descontínuo, pelo movimento rotativo da ferramenta de corte que por sua vez geralmente é multi-cortante, sendo assim possível gerar superfícies de variadas formas. Corroborando com esta definição, a Norma Brasileira define fresamento como um processo mecânico de usinagem focado na obtenção de uma superfície com o auxílio de ferramenta, na maioria dos casos multi-cortante. Neste processo a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória projetada (ABNT, 1971).

Logo entende-se o fresamento como um processo mecânico de usinagem que tem como objetivo a obtenção de superfícies variadas por meio de ferramentas mono ou multi-cortantes e como sub-produto há a geração de material removido conhecido como cavaco. Por isso observa-se no processo a ferramenta girando e a peça usinada se deslocando segundo uma trajetória pré determinada, de acordo com a superfície que se deseja atribuir à peça (STEMMER, 1993).

Por ser um processo no qual pode ser realizado de diversas maneiras e combinações, faz-se necessário elaborar algumas categorias de classificação, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), o fresamento pode ser classificado, de acordo com a disposição das arestas de corte da fresa, em dois tipos:

1° - Denominado fresamento tangencial ou periférico, uma operação onde os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta de corte, em outras palavras, o eixo da fresa é paralelo à superfície que é gerada, conforme ilustrado na Fig. 3.

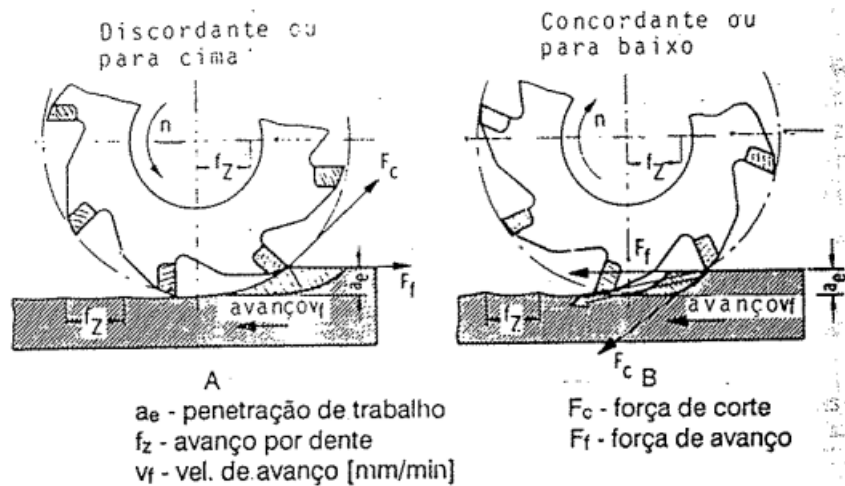


Figura 3 – Fresamento Tangencial ou Periférico (STEMMER, 1993).

2º - Fresamento frontal ou de topo, uma operação onde os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, diferentemente da tangencial como citado anteriormente, ou seja, o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada, assim como ilustra a Fig. 4.

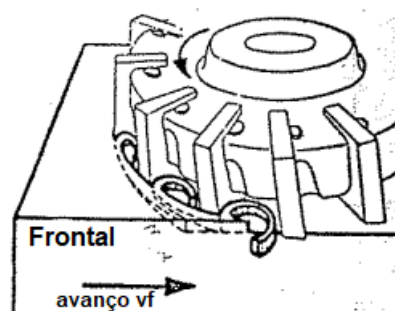


Figura 4 – Fresamento Frontal ou de Topo (STEMMER, 1993).

2.1.1 Parâmetros de corte

De acordo com Hioki (2006) existem alguns fatores que podem ser denominados como parâmetros de corte no processo de fresamento, sendo eles:

- Velocidade de corte.
- Profundidade de corte.
- Penetração de trabalho.
- Avanço.
- Fluidos de corte.
- Sistema de fixação da ferramenta.

Cada um desses fatores influencia diretamente sobre o resultado final da peça e também tem um resultado esperado conforme há variação dos seus valores, como por exemplo, à medida que a velocidade de corte aumenta espera-se que a energia dissipada para a ferramenta diminua (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001), porém a energia total do processo continua aumentando e isso eleva a temperatura sobre a peça. Já para a variação de outros parâmetros como da profundidade de corte, penetração de trabalho e avanço espera-se que uma redução desses parâmetros também reduza a temperatura sobre a peça uma relação antagônica à variação da velocidade.

Em caso de variação do fluido, da forma como é despejado ou vazão do mesmo sobre a peça o que se espera é que o atrito sobre a peça diminua conforme aumente sua vazão ou área de contato. Para o sistema de fixação da ferramenta há diversos resultados esperados. Para cada tipo de mancal existem reações específicas que são esperadas, dentre elas temos uma ampliação do torque, uma rapidez na troca de ferramenta, uma menor oscilação sobre o processo entre outros (HIOKI, 2006).

Quanto as classificações dos parâmetros de corte a norma NBR 6162 (ABNT, 1989) explana sobre diversos parâmetros, dentre eles alguns dos parâmetros são abordados por diversos autores. Estes parâmetros, em suma, podem ser divididos pela definição dada por Diniz, Marcondes e Coppini (2001) onde caracterizam 2 classes de movimentos:

- Movimento ativo - Movimentos no qual há a remoção do material, se dá quando há o contato direto da ferramenta de corte com o produto que está sendo confeccionado.
- Movimento passivo - Movimentos onde não há a remoção de material, em geral são os movimentos de ajuste da máquina, onde se aproxima ou distancia do produto.

Mais detalhadamente dentro os parâmetros Machado et al. (2011) define alguns movimentos ativos que também estão presentes na norma NBR 6162 da ABNT (1989), assim como demonstrado na Fig. 5 eles são classificados como:

- Movimento efetivo - Movimento entre a aresta de corte e a peça, do qual resulta o processo de usinagem, geralmente resultante vetorial do movimento de corte e avanço. Caso não haja movimento de avanço simultâneo será idêntico ao movimento de corte.
- Movimento de corte - Movimento entre a aresta de corte e a peça, onde sem o movimento de avanço, origina uma única retirada de cavaco, durante uma rotação ou um curso.
- Movimento de avanço - Movimento unificado entre a aresta de corte e a peça com o movimento de corte, que provoca a retirada contínua de material.

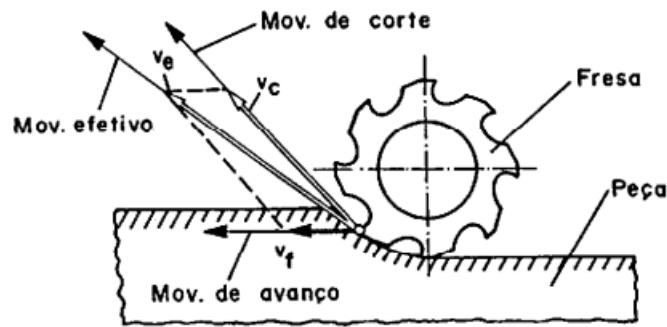


Figura 5 – Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento discor-dante NBR 6162 (ABNT, 1989).

Já para os movimentos passivos Machado et al. (2011) e a NBR 6162 (ABNT, 1989) definem como:

- Movimento de ajuste - Movimento entre a aresta de corte e a peça, onde é pré-determinada a espessura do material a ser removido.
- Movimento de correção - Movimento entre a aresta de corte e a peça, para compensar alterações devidas, como o desgaste da ferramenta, variação térmica, etc.
- Movimento de aproximação - Movimento entre a aresta de corte e a peça, onde a ferramenta se aproxima da peça antes da usinagem.
- Movimento de recuo - Movimento entre a aresta de corte e a peça, onde tem o objetivo de afastar a ferramenta da peça, após a usinagem.

Dentro da NBR 6162 (ABNT, 1989) diversos parâmetros são abordados como dito anteriormente, e ilustrado na Fig. 5, mas fazendo um paralelo com Machado et al. (2011) é possível definir alguns dos parâmetros como os principais agentes sobre um fresamento, para Machado et al. (2011) assim como para Hioki (2006) esses agentes são as velocidades (corte e avanço) e a profundidade de corte, Fig. 6. Esses parâmetros podem ser definidos como:

- Avanço (f) - “É a distância percorrida pelo porta ferramenta em cada rotação” (MITSUBISHI, 2022), medido no plano de trabalho .
- Avanço por dente (f_z) - Percurso de avanço por dente ou aresta de corte, medido no plano de trabalho.

$$f_z = \frac{f}{Z} \quad (2.1)$$

Sendo f o avanço e Z o número de dentes ou arestas de corte.

- Velocidade efetiva (v_e) - Velocidade instantânea do movimento efetivo, no ponto escolhido.
- Velocidade de corte (v_c) - Velocidade instantânea do movimento de corte, no ponto escolhido.
- Velocidade de avanço (v_f) - Velocidade instantânea do movimento de avanço, no ponto escolhido.
- Profundidade ou largura de usinagem (a_p) - Profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho.
- Penetração de trabalho (a_e) - Grandeza de penetração da peça em relação à peça, medida no plano de trabalho e perpendicularmente à direita de avanço.
- Penetração de avanço (a_f) - Grandeza de penetração da ferramenta, medida na direção do avanço.

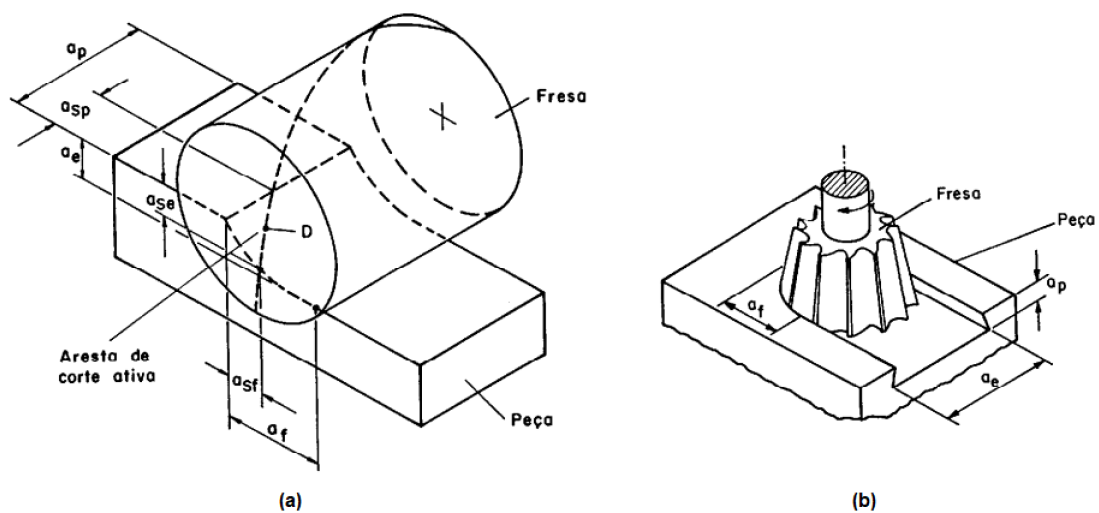


Figura 6 – Representações da ferramenta de corte, (a) Penetração da ferramenta e da aresta de corte, no fresamento tangencial e (b) Profundidade de usinagem, penetração de trabalho e penetração de avanço no fresamento de topo. Adaptado de NBR 6162 (ABNT, 1989).

2.1.2 Forças de corte no fresamento

É interessante observar as relações entre as forças de corte e os parâmetros de corte escolhidos, como velocidade de corte, avanço e também profundidade de corte justamente para que possa selecionar a melhor maneira para a operação desejada. As forças de corte atuam diretamente sobre a vida útil da ferramenta e também sobre as potências de usinagem e no acabamento das peças usinadas (TORRES, 2022), ou seja, impactam o valor da peça confeccionada.

Alguns estudos se fazem presente sobre o assunto visando entender quais são as melhores condições para usinagem em determinados casos, por exemplo, segundo Ross (2008) em casos de uma possível folga entre o fuso e a castanha de comando do avanço da mesa da fresadora quando realizado um fresamento discordante, as forças de corte se opõem à força de avanço, eliminando a folga em sistemas de avanço menos rígidos. Porém em caso de fresamentos concordantes a força de corte acaba puxando a peça para baixo da fresa em uma magnitude proporcional à folga entre o fuso e a castanha, o que gera um cavaco mais espesso do que o esperado pelo avanço programado, logo essa força de corte atuante de forma excessiva pode gerar a quebra dos dentes ou insertos (pastilhas), danificando a ferramenta de corte.

As forças presentes no processo de fresamento, em geral, podem ser decompostas conforme ilustrado na Fig. 7:

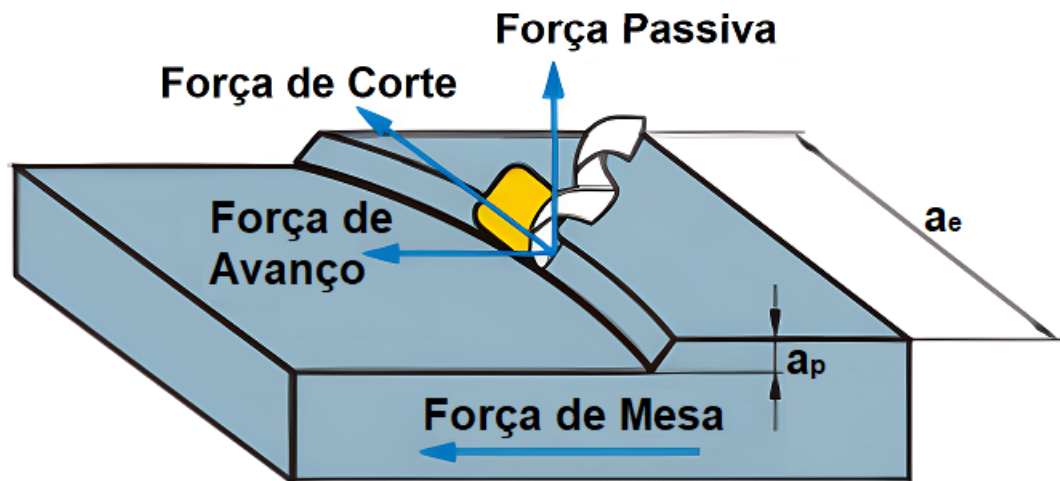


Figura 7 – Decomposição das forças de corte no fresamento. Adaptado de (MITSUBISHI, 2012).

Sobre as componentes que mais afetam nas forças de corte em geral (MACEDO, 2001), pode-se citar:

- Ferramenta de corte.
- Material da peça.
- Parâmetros de usinagem.
- Fluido de corte.
- Adversidade como relações químicas.
- Máquina-ferramenta.

Cada um dos componentes citados pode contar com “sub-categorias”, formando uma espécie de fluxograma como pode ser observado na Fig. 8, isso devido aos inúmeros fatores que agem sobre as forças.

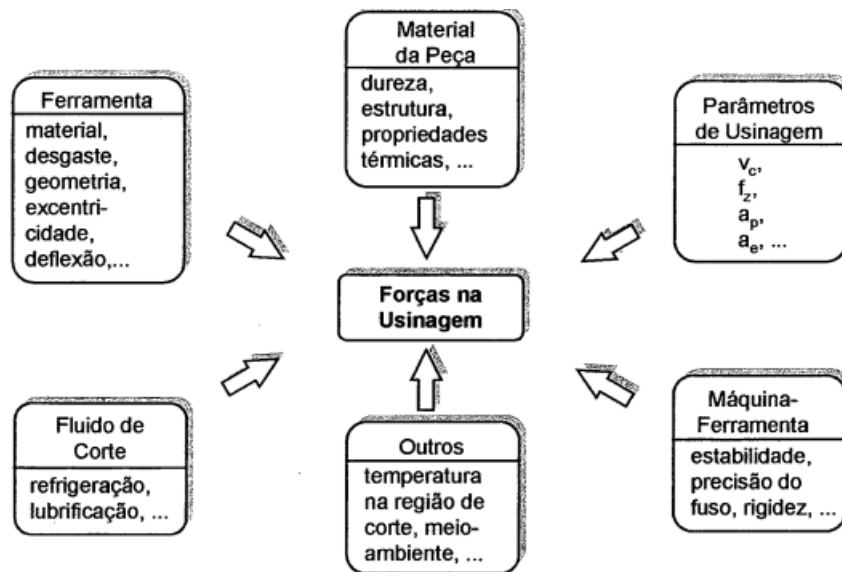


Figura 8 – Fatores de influência sobre a força de usinagem (MACEDO, 2001).

Ainda sobre as forças Diniz, Marcondes e Coppini (2001) dividem as principais forças de usinagem em força passiva ou de profundidade (F_p), onde é a componente perpendicular ao plano de trabalho e também em força ativa (F_a), que é a componente que está no plano de trabalho, e pode ser decomposta em:

- Força efetiva de corte (F_e) - Componente da força ativa F_a , segundo a direção de efetiva.
- Força de corte (F_c) - Componente da força ativa F_a , segundo a direção de corte.
- Força de avanço (F_f) - Componente da força ativa F_a , segundo a direção de avanço.

Essa divisão realizada por Diniz, Marcondes e Coppini (2001) também se da presente na norma NBR 12545 (ABNT, 1991). Na norma pode-se ver mais subcomponentes das força passiva e força ativa. Com o intuito de sintetizar a divisão das forças atuantes sobre o processo de usinagem a Fig. 9, presente na norma, auxilia a compreensão das forças atuantes.

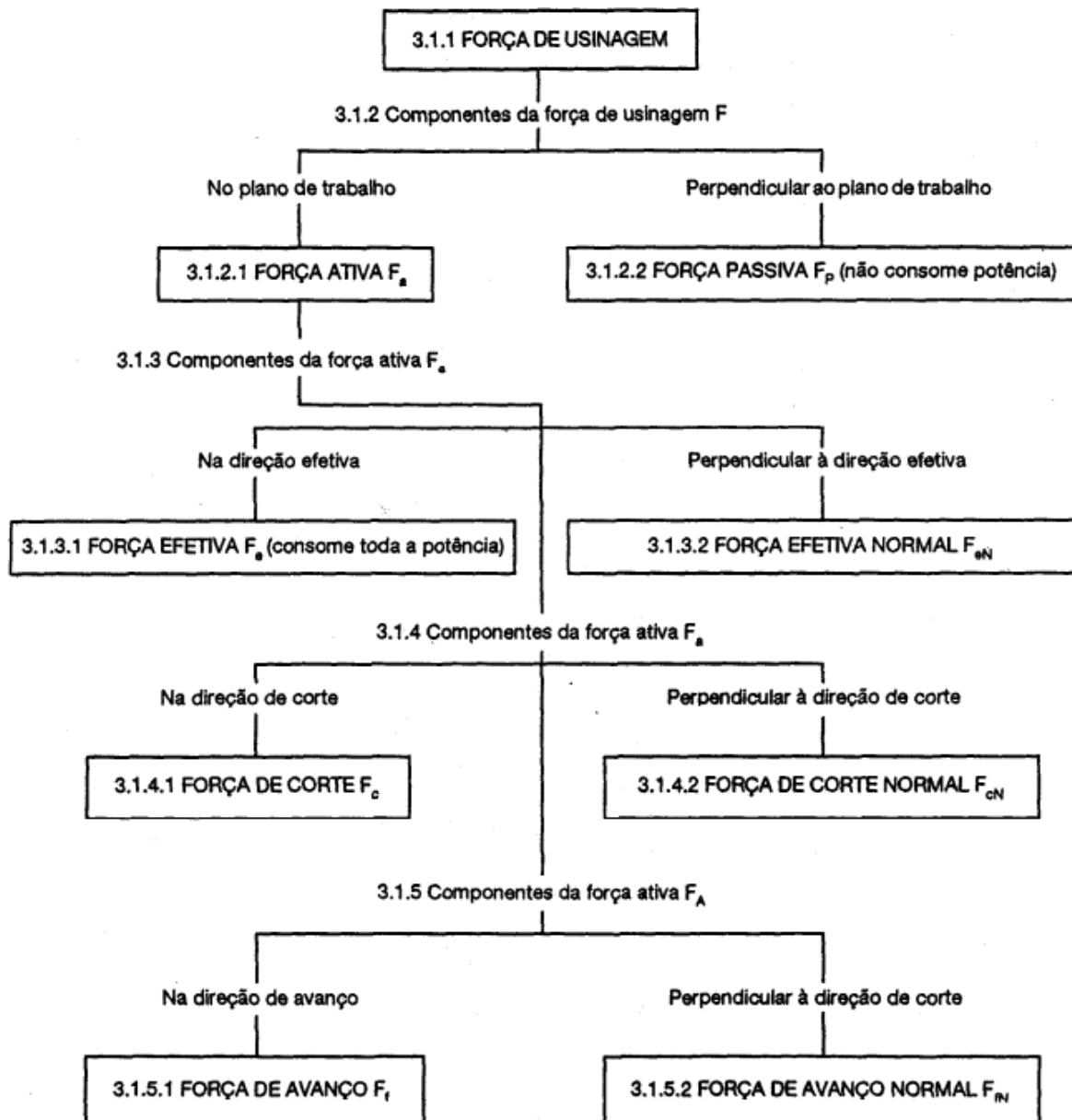


Figura 9 – Decomposição das forças presentes na usinagem NBR 12545 (ABNT, 1991).

2.1.3 Temperatura no fresamento

Outro fator que influencia sobre o custo da usinagem é a temperatura do processo, de acordo com Trent e Wright (2000) a maior parte da potência consumida pelo processo de usinagem de metais é transformada em calor na região próxima a aresta de corte da ferramenta o que ocasiona diversos problemas, diretos ou indiretos, sobre o processo. Como a maior parte dos processos de usinagem são realizados sobre peças de metais, e esses metais usinados geram um maior aquecimento para a ferramenta, isso impacta sobre a vida útil da ferramenta por consequência também sobre o valor do produto (MACHADO et al., 2011).

Parâmetros de usinagem como avanço, profundidade de corte, geometria da fer-

ramenta, velocidade de corte, fluido de corte e também alguns fatores externos como, por exemplo, o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, são variáveis que influenciam as temperaturas de usinagem (ANDRE, 2017). A velocidade, em específico, é um parâmetro claro de inter-relação da temperatura com os parâmetros de fresamento, onde torna-se notável que com um aumento na velocidade de corte (principalmente) ou de avanço a temperatura sobre a ferramenta de corte tende a aumentar também. Os demais fatores têm uma relação esperada quando alterados, mas não são tao inter-relacionados como o caso da velocidade.

Na usinagem com ferramenta com geometria definida, como o fresamento, a maior parte do calor gerado no processo de usinagem é transferido para o cavaco e uma parcela menor, porém também significativa, é transferida para a ferramenta de corte, pouco do calor é transferido para a peça como pode ser observado na Fig. 10.

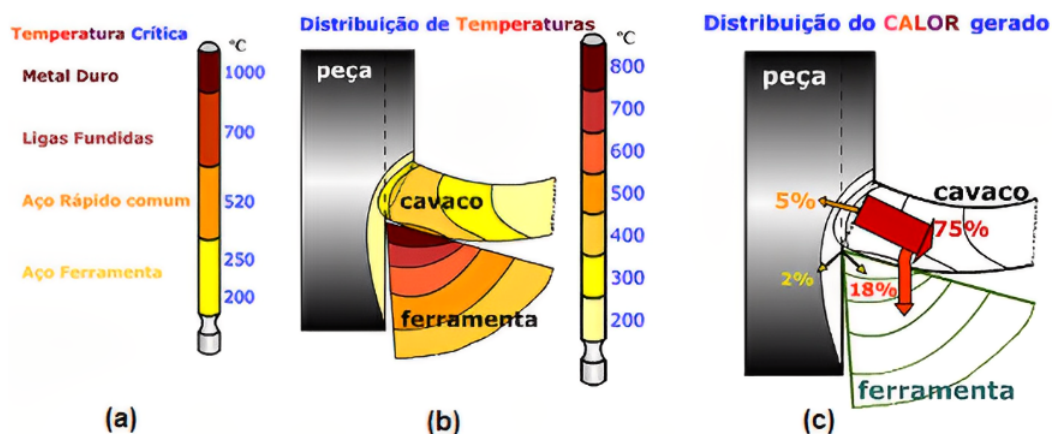


Figura 10 – Tabela de temperaturas críticas para diferentes materiais de ferramenta (a), distribuição típica de temperaturas na região de corte (b) e a distribuição de calor na região de corte (c). Adaptado de (CIMM, 2010).

De acordo com CIMM (2010) o cavaco absorve cerca de 75% do calor gerado durante o processo, enquanto para a ferramenta vão 18% e para a peça algo em torno de 7%, isso demonstra que a ferramenta de corte ainda sim absorve uma parcela de calor alta e que pode ser capaz de danificá-la. Pode-se perceber também que há uma relação entre o material usinado e a temperatura sofrida pela ferramenta, onde quanto maior a dureza do material, ou seja com maior teor de carbono e maior ponto de fusão, maior será a temperatura sobre a ferramenta.

2.2 Fluidos de Corte

Fluidos de corte no processo de fresamento têm diferentes funções e podem ser utilizados ou não durante o processo. De acordo com Machado et al. (2011) os usos mais comuns para o fluido de corte são para lubrificação em baixas velocidades de corte, proteção seja para a máquina e ferramenta ou até mesmo para a peça contra oxidação,

remoção dos cavacos, mas na maioria dos casos utiliza-se os fluidos de corte para minimizar o coeficiente de atrito entre ferramenta e peça, e por consequência diminuir o calor gerado, uma vez que nas ferramentas de corte estão presentes variações de temperatura grandes, principalmente no momento em que a aresta de corte entra ou sai do corte, isso sujeita a aresta de corte a choques térmicos e tensões cíclicas, que por sua vez podem vir a ocasionar trincas e, até mesmo, o fim prematuro da vida útil da ferramenta (SANDVIK, 2022).

Assim como para Machado et al. (2011) para Trent e Wright (2000) a atuação dos fluidos de corte além de ajudar a refrigerar a região de corte em altas velocidades de corte, lubrificar a região de corte em baixas velocidades e altas tensões de corte, auxiliar na quebra e transporte do cavaco, esse componente ainda auxilia na redução da força de corte, melhora a vida da ferramenta, o acabamento superficial e a precisão dimensional da peça e também deixam uma camada protetora sobre a superfície usinada e protegem a máquina-ferramenta contra oxidação.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2001) o uso do fluido de corte torna possível minimizar os efeitos negativos sobre a ferramenta como o dano térmico à estrutura superficial da peça, o desgaste da ferramenta e até mesmo a dilatação térmica da peça, o que possibilita um processo de usinagem com tolerâncias menores na peça e um acabamento melhor.

Para um processo de usinagem de excelente qualidade o fluido de corte deve ser cuidadosamente escolhido, existem diversos tipos, modelos e qualidade, mas segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001) os principais fatores de escolha do fluido adequado que devem ser considerados na hora da escolha são:

- Boa capacidade de absorção de calor.
- Boas propriedades anti-fricção e anti-soldante.
- Capacidade de envolver o material eficientemente.
- Estabilidade durante seu uso e armazenamento.
- Baixa interação química com a peça.
- Não causar danos a saúde do operador.
- Não formar fumaça.
- Uma certa transparência.

2.2.1 Tipos de fluido de corte

A variedade de tipos de fluido de corte disponíveis no mercado é vasta, o que torna fundamental a sua caracterização, o que também é uma tarefa difícil, já que não há um

consenso quanto a classificação dos fluidos, por exemplo, de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2001) pode-se dividir em categorias como ar, aquosos (água, emulsões ou soluções químicas) e óleos (óleos minerais, graxos, compostos, de extrema pressão ou de usos múltiplos). Uma segunda divisão adotada por Klocke (2009) classifica os fluidos de corte da seguinte forma:

- Soluções aquosas - Compostas por mais de 90% de água e possuem uma boa capacidade de refrigeração. Não possuem óleo mineral na composição, e podem contar com polímeros, sais ou óleo do tipo sintético, que se misturam completamente a água, sem a necessidade do uso de agentes emulsificadores. Isso torna as propriedades de lubrificação menos favoráveis do que as emulsões.
- Emulsões - Compostas por cerca de 90% água com 10% óleo, possuem uma boa capacidade de refrigeração assim como as soluções.
- Óleos - São a base vegetal ou mineral, possuem uma viscosidade cinemática bem maior do que a da água, o que os torna ótimos fluidos de corte em lubrificação.

Já para Motta (1994) - apud Vieira (1997), p.5, a classificação pode ser dada em soluções (um fluido base que sofre adição de outros componentes solúveis no mesmo a fim de atender um objetivo, em geral óleos minerais e soluções químicas a base de água) e emulsões (fluido composto por duas fases, sendo uma parte água e outra um óleo escolhido).

Outro ponto importante para a classificação dos fluidos são os aditivos que somam ao fluido base, muitas vezes as propriedades como anti-solda, neutralidade, inodoro, anti-corrosão e oxidantes, anti-espumante, transparência, anti-desgaste, absorção de calor, compatibilidade com meio ambiente e baixa variação de viscosidade são buscadas para um fluido de corte, desta forma alguns aditivos são somados ao fluido base para tentar atender as necessidades, os mais conhecidos são:

- Antiespumantes.
- Anticorrosivos.
- Detergentes.
- Emulsificantes ou Emulgadores.
- Surfactantes.
- Biocidas.
- Aditivos de extrema pressão (EP) e Anti-desgaste.

2.2.2 Técnicas de aplicação de fluido de corte

As técnicas ou métodos de aplicações de fluidos de corte têm algumas classificações de acordo com diferentes autores, para Machado et al. (2011) as técnicas de aplicação podem ser divididas em:

- Jorro a baixa pressão - método mais convencional devido a facilidade de implementação em qualquer processo.
- Atomização (de 1 a 5 bar) - método de mínima quantidade de fluido (MQL), visa a injeção de pequenas porções de fluido na área onde esta sendo usinada.
- Sistema a alta pressão (até 163 bar) - método com complexidade e custos elevados devido a necessidade de equipamentos mais robustos para fornecer a pressão necessária.

Os métodos comumente utilizados nos dias atuais são o método convencional ou jorro a baixa pressão e o de mínima quantidade de lubrificante (MQL) (TORRES, 2022). O método convencional, devido à facilidade de aplicação, é amplamente difundido e tem suas vantagens, decorrente da quantidade de fluido empregada durante essa técnica ele possui um grande poder refrigerante, fazendo com que tenha uma excelente troca de calor durante o processo de fresamento (RIBEIRO, 2017) e diminua as distorções na peça (TORRES, 2022). Por outro lado, o fato de ter baixa pressão e uma vazão de fluido elevada torna essa técnica de um ponto de vista ambiental e industrial pouco eficiente, já que tem seu custo elevado pela quantidade de fluido necessário para o processo, conforme pode ser observado na Fig. 11.



Figura 11 – Jorro a baixa pressão de fluido em fresamento (FLUVISERRA, 2022).

Devido ao conjunto de fatores como alterações de filosofia de responsabilidade ambiental, pressões políticas e também dos pontos negativos da técnica convencional a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) vêm sendo estudada cada vez mais

pelos fabricantes de máquina e ferramenta e pelo meio científico esta técnica (NASCI-MENTO; BIANCHI; AGUIAR, 2012). Esta é uma técnica que basicamente está entre a de jorro a baixa pressão e a do sistema de alta pressão e consiste em aplicação mínima do fluido, de forma pulverizada na região onde esta ocorrendo a remoção do material. Assim como qualquer técnica a MQL possui seus pontos positivos como economia de fluido e um custo de implementação não muito elevado (RIBEIRO, 2017) e também seus pontos negativos como a maior facilidade de formação de nevas e fumaças e uma maior emissão de gases, tornando necessário um maior controle sobre o processo. Na Fig.12 é possível observar a quantidade de fluido aplicado durante o processo que utiliza a técnica MQL.



Figura 12 – Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) em fresamento (CADIUM, 2022).

Mesmo que as técnicas mais usais sejam jorro a baixa pressão e o método MQL, ainda sim existem outras diversas outras técnicas, algumas mais simples como a não utilização de fluidos durante o processo (corte a seco) e outras mais novas e mais elaboradas como a utilização de componentes como nitrogênio líquido ou dióxido de carbono líquido. Estas técnicas por sua vez vêm sendo cada vez mais aperfeiçoadas e estudadas para que possam servir de ferramenta em alguns processo e gerem bons resultados na peça confeccionada.

2.3 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)

Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) é um processo produtivo que concilia técnicas de manufatura aditiva com tecnologias tradicionais de soldagem. Este processo divide o componente desejado em diversas camadas que serão depositadas pela tocha do equipamento, podendo ser depositadas tendo como base para fonte de energia processos de soldagem tradicionais ou não-convencionais (HACKENHAAR, 2020).

Um dos processos tradicionais de soldagem que pode ser conciliado com a metodologia da manufatura aditiva é o processo denominado *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)

ou como conhecido popularmente soldagem MIG (*Metal Inert Gas*)/MAG (*Metal Active Gas*), neste processo ocorre a formação de um arco elétrico envolto por uma atmosfera gasosa de proteção e estabelece uma circulação da corrente elétrica que alimenta continuamente o metal de base e um eletrodo consumível (FORTES, 2005). Logo com o arco elétrico gera-se um calor que está protegido pelo gás e é utilizado para unir duas ou mais peças metálicas, certificando a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas da junta soldada (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Em outras palavras obtém-se geometrias por meio da sobreposição dos cordões de solda pelo movimento da tocha do equipamento em diversas camadas/fatias (NOVELINO, 2021), como ilustrado na Fig. 13. Esse fator torna viável a fabricação de peças que possuem geometrias complexas ou materiais de alto custo, que usualmente possuiriam altos custos de produção ou seriam inviáveis, (HACKENHAAR, 2020) e (ALBERTI; SILVA; D'OLIVEIRA, 2014), ainda que após a deposição do material este processo normalmente necessita de uma etapa de pós processamento visando melhorar o acabamento (NOVELINO, 2021) ainda sim esse processo atrai o interesse dos mais variados ramos da indústria.

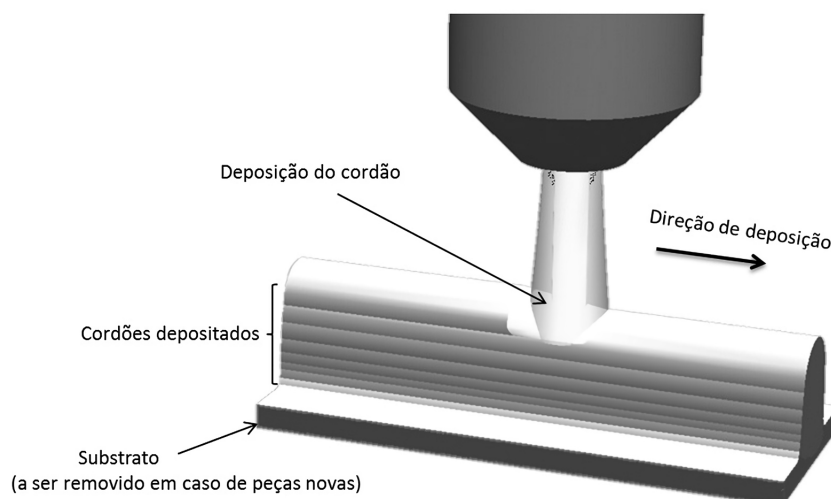


Figura 13 – Representação do processo MADA (ALBERTI; BUENO; D'OLIVEIRA, 2015).

Algumas características dos objetos confeccionado por esse método de fabricação são de extrema relevância (ROSA, 2020), sendo eles:

- Propriedades Mecânicas - costumeiramente apresentam anisotropia e porosidade.
- Defeitos - apresentam defeitos como trincas, porosidade, oxidação, incoerência geométrica dos cordões e a tensão residual.
- Precisão Dimensional - algumas geometrias curvas dificultam a precisão dimensional.

2.3.1 Acabamento em peças impressas por deposição a arco

Pelo fato do processo MADA confeccionar as peças por meio de adições sucessivas de material em camadas por cordões de solda e suas orientações sendo obtidas por meio de um desenho computacional 3D do componente (VOLPATO et al., 2017), como ilustrado nas Fig. 14 e 15, normalmente é interessante conciliar algum processo de usinagem sobre a peça confeccionada para obter um melhor acabamento sobre a mesma.

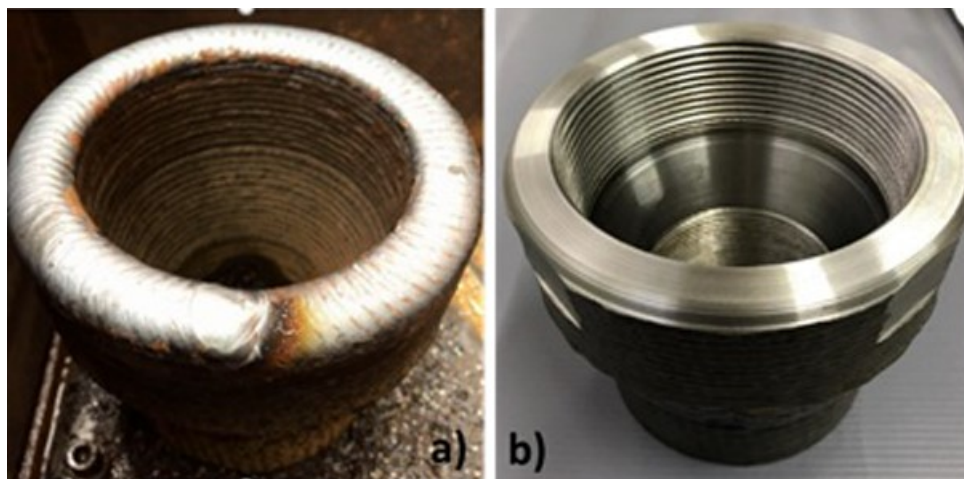


Figura 14 – Após a deposição - espessura média de 20mm e 140mm de comprimento (a), após a usinagem (b). Adaptado de (CARVALHO et al., 2020)

Assim como qualquer processo de fabricação a MADA possui alguns defeitos que podem ocorrer durante a confecção de um produto, como:

- Porosidade.
- Deformações.
- Trincas.
- Oxidação.
- Delaminação.
- Tensões residuais.

Segundo Wu et al. (2018) os defeitos gerados decorrem de fatores diferentes podendo ser falta de ajustes de parâmetros de produção corretos, características do material depositado, formas de movimentação entre outros. Isto demonstra que as peças confeccionadas pela metodologia WAAM em sua maioria dependem de etapas de pós processamento para tentar corrigir os defeitos apresentados ou então, como citado anteriormente e observado nas Fig. 14 e 15, obter melhores resultados de acabamento.

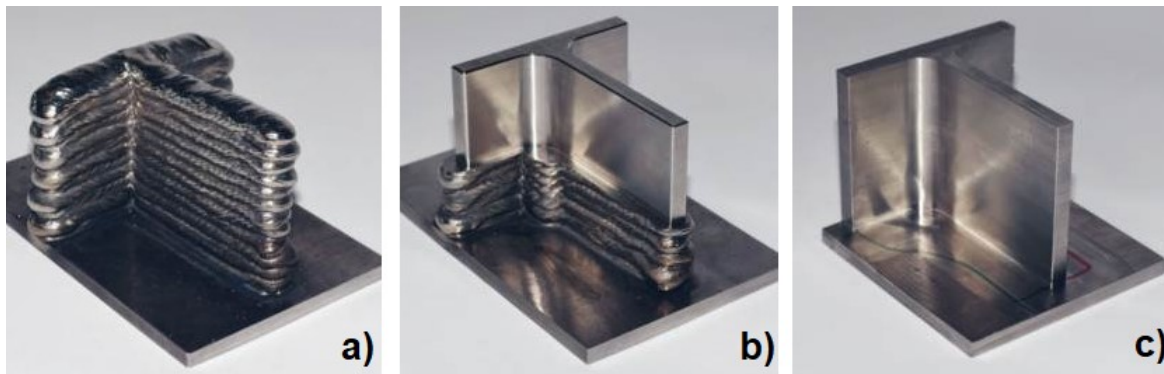


Figura 15 – Após a deposição (a), peça semi-tratada (b) e peça usinada por completo (c). Adaptado de (GMBH, 2022)

2.3.2 Fresamento de peças impressas

Fresamento em peças de aço de baixa liga e baixo carbono em geral são processos com fácil usinabilidade, porém segundo Barreto (2022) quando se trata de peças confeccionadas pelo processo WAAN, o processo em si se torna um pouco diferente, isso foi constatado no estudo quando realizou-se a usinagem de uma peça confeccionada por WAAN com material de deposição ER70S-6 com os padrões usuais para peças de aços com baixo carbono e a ferramenta de corte foi danificada, sendo necessário utilizar parâmetros reduzidos para realizar o fresamento da peça.

Como abordado anteriormente para realização do processo WAAN é necessário envolver a fusão e solidificação do material de forma sequencial e isso faz com que cada região da peça confeccionada seja submetida a diversos ciclos de aquecimento e resfriamento velozes, além de fazer com que cada camada depositada enfrente um gradiente de temperatura pela deposição das camadas superiores e também pelo resfriamento da camada inferior. Esses ciclos térmicos segundo Nemani, Ghaffari e Nasiri (2020) geram uma heterogeneia na microestrutura da peça e também desenvolve propriedades mecânicas anisotrópicas na mesma, o que pode fazer com que seja mais difícil fresar este tipo de material.

Ainda sobre as peças confeccionadas pelo método WAAN, como dito anteriormente, esse método basicamente deposita camada por camada, uma em cima da outra (HACKENHAAR, 2020), isso pode fazer com que a estrutura da peça usinada venha a descolar, destacar, durante o processo de fresamento como demonstrado na Fig. 16, vale ressaltar que na Fig. 16 um outro defeito oriundo da ferramenta de corte ficou evidenciado no meio do canal estudado enquanto o defeito de arrancamento de material pode ser visto pelas setas indicando-o, já que esse processo possibilita a formação de porosidade e também iniciações de trincas na microestrutura da peça confeccionada (OLIVEIRA, 2022).

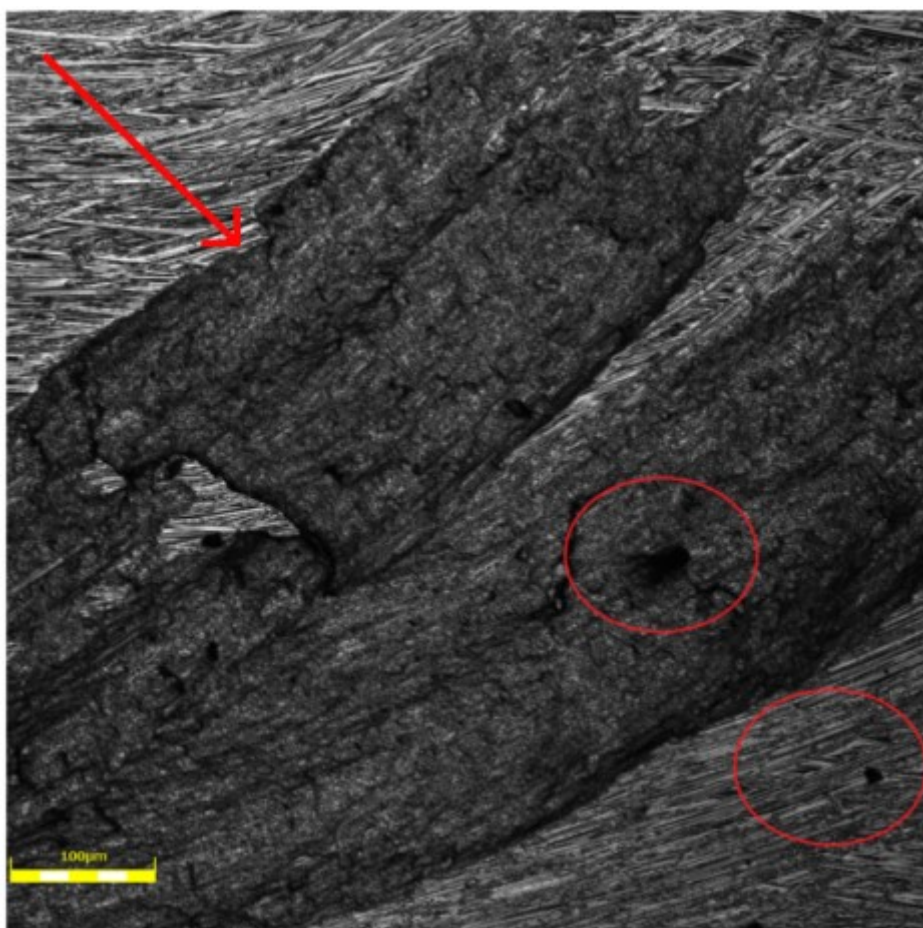


Figura 16 – Parte do canal usinado, formado por movimentos concordantes, com defeitos visíveis. (BARRETO, 2022)

3 Materiais e Métodos

3.1 Procedimento experimental

Para coleta de dados e também para garantir que os resultados coletados possam ser reproduzidos em outros laboratórios, obtendo os mesmos produtos, sendo eles válidos e concisos, o presente estudo seguiu os seguintes passos:

1. Análise visual da peça - Foi verificado se a peça estudada não possuía avarias visíveis e/ ou algum ponto defeituoso nítido.
2. Preparação da peça - Realizado o corte e faceamento na peça, passo importante para que a peça se adeque a geometria desejada, a fim de que se encaixe com maior facilidade sobre as superfícies dos instrumentos utilizados (Microscópio e Durômetro).
3. Análise microscopia da peça - Após o processamento foi realizada uma análise mais criteriosa da peça, com auxílio de microscópio procurou-se trincas e/ ou fraturas microscópicas na mesma.
4. Coleta dos parâmetros iniciais - Foi feita a medição inicial da rugosidade superficial da amostra e da dureza Brinell medida no centro do canal usinado, por ser uma medida comumente utilizada nos estudos científicos, antes do fresamento.
5. Realização do fresamento de topo da amostra - Realizou-se o primeiro fresamento seguindo a ordem proposta pelo estudo.
6. Análise microscopia da peça - Por meio de microscópio procurou-se por trincas e/ ou fraturas microscópicas na mesma novamente para efeito comparativo com o estado inicial.
7. Coleta das variáveis de saída - Foi medida dureza e rugosidade da mesma forma como foi realizado no passo 4 para efeito comparativo.
8. Comparação dos resultados coletados - Por fim foram comparados os valores obtidos de cada ensaio para entender a influência das atmosferas lubri-refrigerantes sobre o fresamento da peça.

A fim de facilitar a visualização foi elaborado um fluxograma para representar as etapas, ele pode ser observado na Fig. 17.



Figura 17 – Fluxograma da etapas do procedimento.

3.2 Caracterização do material

A peça usinada neste estudo foi confeccionada por meio do processo MADA, que se baseia em fusão do arame consumível pelo arco elétrico associado com um processo denominado *Cold Metal Transfer* (CMT) conforme o estudo do autor Novelino (2021). O material de composição das amostras é o arame ER70S-6, cuja composição química segue os valores da Tab. 2.

Tabela 2 – Composição química do arame o ER70S-6 (BÖHLER, 2022).

% Carbono (C)	% Magnésio (Mn)	% Silício (Si)
0,07	0,85	1,50

No estudo do autor Novelino (2021) foi utilizado para a deposição o Robô Cartesiano da Schneider Electric modelo MAXR23-S42-H42-C42, uma fonte da fabricante Fronius modelo TransPuls Synergic 5000 CMT, o arame utilizado para a deposição foi o ER70S-6 com 1,20 mm de diâmetro e por fim os parâmetros adotados para confecção da peça seguem os listados na Tab. 3.

Tabela 3 – Parâmetros médios para a obtenção da peça estudada (NOVELINO, 2021).

Corrente (A)	Voltagem (V)	Velocidades		
		Alimentação do Arame (m/min)	Deposição Vertical (mm/s)	Deposição Horizontal (mm/s)
62,0	20,6	2,6	24,0	8,0

A deposição do material foi bidirecional com arco contínuo e formou-se uma parede de 100 camadas, como ilustrado na Fig. 18. Utilizou-se uma mistura de gás de proteção de Ar+18% CO_2 com uma vazão de 15 l/min.

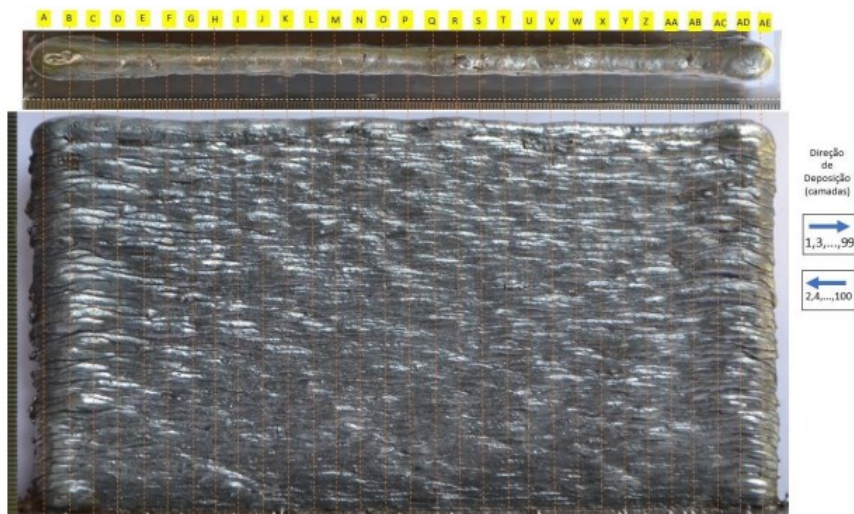


Figura 18 – Peça confeccionada com parede de 100 camadas (NOVELINO, 2021).

Após a confecção da peça, para obter as dimensões 160 x 37 x 6 mm a mesma passou por um processo de corte como representado na Fig. 19 e na Fig. 20.

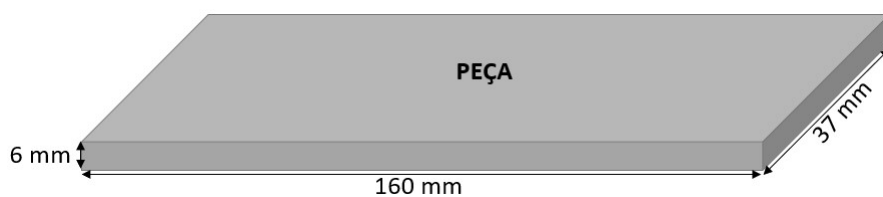


Figura 19 – Representação da peça com suas medidas.

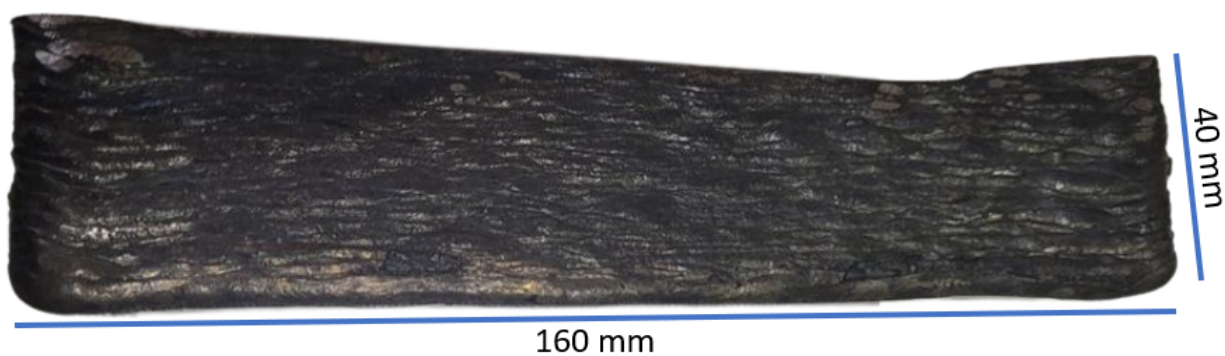


Figura 20 – Peça utilizada para os testes.

3.3 Ferramenta de Corte

A ferramenta escolhida para este estudo foi a fresa G9A69050 composta de metal duro revestido com nitreto de titânio alumínio (TiAlN), possui 5 mm de diâmetro e 4 arestas de corte, da fabricante YG-1. A escolha desta ferramenta de corte foi feita por observar que no estudo da autora Barreto (2022), onde utilizou-se de uma ferramenta de aço rápido para fresamento do mesmo material foi possível realizar testes sem desgaste aparente na ferramenta, desta forma a escolha de uma ferramenta como a fresa G9A69050 se deu por ela ser uma fresa com uma dureza maior além de possuir o revestimento que deve reduzir a influência do desgaste da ferramenta sobre os resultados coletados durante o processo.

A fresa G9A69050 pode ser visualizada na Fig. 21 e suas especificações constam na Tab. 4.



Figura 21 – Ferramenta de corte utilizada para os testes.

Tabela 4 – Especificações da ferramentas de corte (WORKFER, 2022)

ESPECIFICAÇÕES DA FERRAMENTAS DE CORTE	
Diâmetro (mm)	5
Tolerância diâmetro (mm)	(0 ~ -0,03)
Diâmetro da base (mm)	5
Comprimento útil (mm)	16
Comprimento da haste (mm)	35
Comprimento total (mm)	51
Tolerância diâmetro na base	h5
Arestas de corte	4
Tipo de haste	Cilíndrica
Ângulo de hélice	30°
Sentido de corte	Direita
Material	Metal duro
Revestimento	Nitreto de titânio alumínio (TiAlN)

3.4 Máquina-Ferramenta

Os ensaios de fresamento de topo deste estudo ocorreram no Laboratório de Usinagem, da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB) - Campus Darcy Ribeiro, no centro de usinagem vertical VEGA modelo XH7132, apresentado na Fig. 52. Os dados técnicos do equipamento podem ser encontrados na Tab. 5.



Figura 22 – Centro de usinagem vertical - VEGA XH7132.

Tabela 5 – Especificações da máquina-ferramenta (MADRAS, 2022).

ESPECIFICAÇÕES - VEGA XH7132	
Modelo	XH7132
Motor principal (eixo)	3,7 kW
Motor de alimentação	1,2 kW
Bomba de resfriamento	0,1 kW
Distância da extremidade do fuso ao tampo da mesa	100 - 600 mm
Distância do centro do fuso até a guia da coluna	395 mm
T-slot (número / largura / distância)	3 / 14 / 85 mm
Deslocamento da mesa (X, Y, Z)	620 x 350 x 500 mm
Máx. dimensão da ferramenta	φ 120 x 200 mm
Tamanho da mesa	920 x 320 mm
Velocidade de alimentação rápida (X, Y, Z)	18000 mm/min
Velocidade de alimentação (X, Y, Z)	2,5 - 3000 mm/min
Repetir precisão de posicionamento	\pm 0,0075
Precisão de posicionamento	\pm 0,015
Capacidade do magazine de ferramentas	16 Un
Faixa de velocidade do fuso	60 - 6000 rpm
Máx. peso da ferramenta	8 kg
Conicidade do eixo	BT40
Sistema CNC	Fanuc Oi Mate - MD

3.5 Parâmetros de Usinagem

No trabalho da autora Barreto (2022) foi realizado um estudo sobre a usinagem de peças de arame ER70S-6 confeccionada pelo processo MADA onde a autora identificou a falta de padrões na literatura para a usinagem de peças confeccionadas por esse processo, então utilizou-se dos padrões da literatura para usinagem de Aço 1020 e 1040, tendo em vista algumas características semelhantes entre esses materiais, ER70S-6, Aço 1020 e 1040.

Entretanto foi registrado durante os ensaios preliminares no centro de usinagem vertical VEGA XH7132 no estudo da autora Barreto (2022) que os valores presentes na literatura para aço 1020 e 1040 resultaram na quebra da ferramenta de corte no início da usinagem do primeiro canal. Devido a este registro os parâmetros de usinagem neste trabalho seguiram os parâmetros alterados da autora Barreto (2022) e também utilizados pelo autor Ribeiro (2023) que usinou uma peça de ER70S-6 confeccionada por MADA e estudou a influência dos posicionamentos dos bocais de fluido, já que segundo Barreto (2022) após o ajuste em alguns parâmetros foi possível obter bons resultados superficiais sobre a peça e no estudo do Ribeiro (2023) não foi relatado nenhum problema com a ferramenta de corte, que pode concluir que a mesma suportou o processo de usinagem. Na Tab. 6 estão apresentados os parâmetros de corte adotados.

Tabela 6 – Parâmetros de corte (BARRETO, 2022)

Profundidade de corte axial (mm)	Avanço por dente (mm/dente)	Velocidade de corte (m/min)	Penetração de trabalho (mm)
0,500	0,025	10,000	5,000

3.6 Atmosferas Lubri-refrigerantes

Neste estudo a diferença das atmosferas lubri-refrigerantes foi analisada pelo resultado de diferentes ensaios de fresamento representados esquematicamente na Fig 23, neste caso foram elaborados 5 variações para tentar visualizar melhor o efeito que essas atmosferas causam sobre a peça estudada, são elas:

- Corte com 2 bocais;
- Corte com 1 bocal;
- Corte com 2 bocais e ar comprimido;
- Corte com ar comprimido;
- Corte a seco;

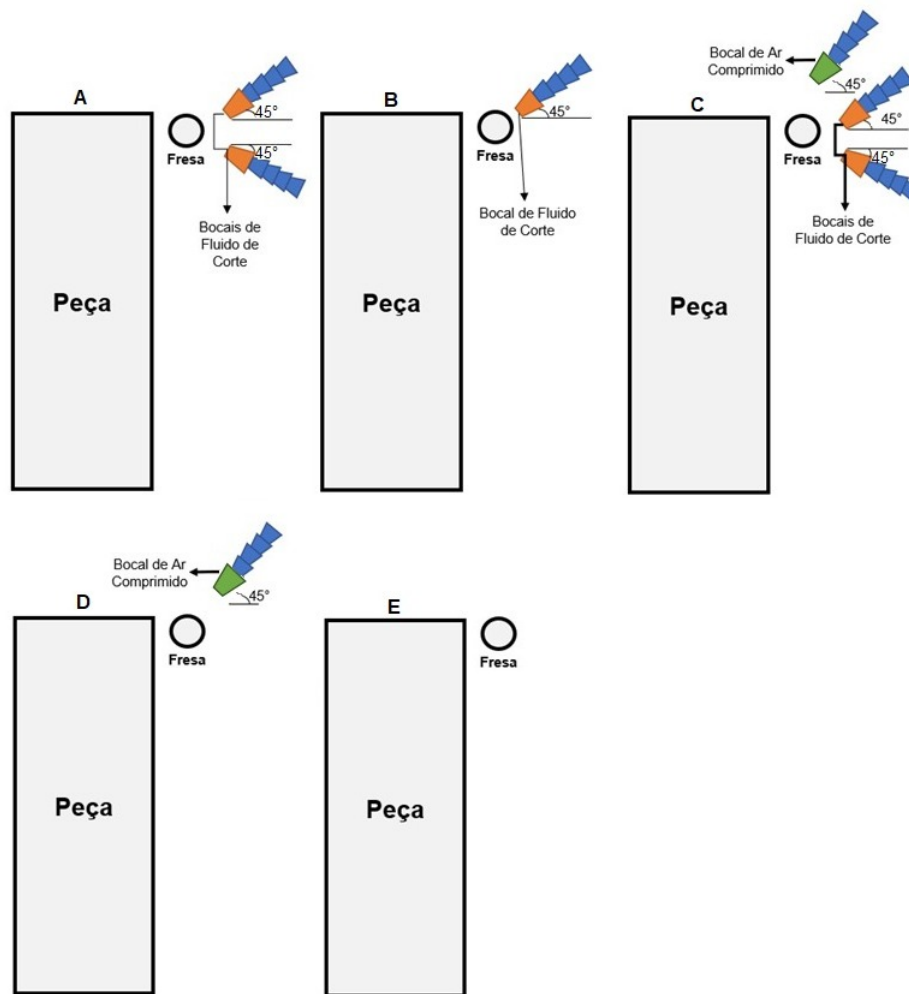


Figura 23 – A) Representação do ensaio de corte com 2 bocais, B) Representação do ensaio de corte com 1 bocal, C) Representação do ensaio de corte com 2 bocais e ar comprimido, D) Representação do ensaio de corte com ar comprimido e E) Representação do ensaio de corte seco

Em todos os ensaios a vazão utilizada foi 10 l/min por bocal, com os bocais posicionados a 45° e fluido injetado a favor do avanço, como pode ser observado na Fig. 24, o ângulo de 45° foi escolhido por possuir um bom jateamento de fluido de corte sobre a ferramenta e a peça. A quantidade de bocais e suas combinações, foram escolhidas para representar as possibilidades disponíveis para o centro de usinagem Vega.

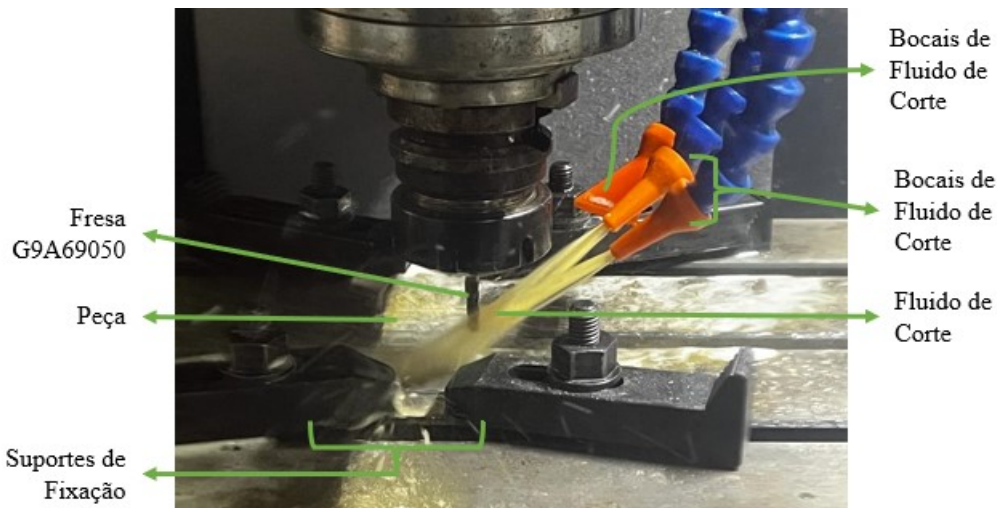


Figura 24 – Demonstração de posicionamento dos bocais durante os ensaios.

No primeiro caso a peça foi usinada com auxílio do fluido de corte solúvel sendo injetado por 2 bocais posicionados atrás da ferramenta de corte, como pode ser observado na Fig. 24, sendo assim a atmosfera lubri-refrigerante presente foi a com 2 bocais de injeção totalizando 20 l/min de fluido. Para o segundo caso foi retirada a injeção de fluido de corte de um dos bocais, deixando apenas 1 bocal injetando fluido a vazão de 10 l/min. O próximo ensaio envolve a utilização dos 2 bocais de fluido de corte e também do bocal de ar comprimido presentes no centro de usinagem Vega, essa usinagem é atípica e não muito utilizada devido ao fato do ar comprimido poder retirar o fluido de corte das áreas desejadas.

Para o quarto ensaio foi utilizado apenas o bocal de ar comprimido sobre a peça, com a intenção de aumentar a refrigeração gerada pelo ar atmosférico, já que o mesmo estará atuando sobre a peça de uma forma mais intensa do que no caso do corte a seco, além disso esse método é conhecido por favorecer a remoção dos cavacos da região de corte. E por fim, o caso com maior atrito ferramenta/peça, desabilitou os bocais de injeção de fluido e utilizou-se apenas o ar atmosférico.

Como fluido de corte utilizado foi o BIO100e da fabricante Biolub Química Ltda indicado para diferentes processos de usinagem, este é sintético, biodegradável e utilizado em forma de solução aquosa (mistura de 19 porções de água para 1 de fluido) com um tom transparente esverdeado. Este fluido possui uma grande poder lubrificante, refrigerante e anticorrosivo, durabilidade e também não provoca manchas em ligas de baixa fusão à base de Cobre/Alumínio, Alumínio e Aços inoxidáveis (BIOLUB, 2022).

Pode-se observar na Tab. 7 a concentração do fluido utilizado e sua transparência, quanto a Tab.8 é possível notar algumas de suas características físicas e químicas.

Tabela 7 – Tabela de concentração (BIOLUB, 2022)

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 (BIOLUB, 2022)

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

Vale ressaltar que no quarto caso houve uma associação dos 2 bocais injetando o fluido e 1 bocal injetando ar comprimido. Este último caso é mais sensível, caso seja aplicado de forma equivocada o ar comprimido pode atuar contrapondo o fluido e expulsando-o da área correta de aplicação diminuindo a capacidade lubri-refrigerante do fluido, então antes de coletar os resultados deste último caso faz-se necessário observar uma combinação de posição dos bocais a fim de evitar que os componentes anulem os efeitos um do outro.

3.7 Variáveis de saída

Para tornar possível a comparação dos resultados após a realização dos testes com os casos elaborados neste estudo, as variáveis de saída que serão coletadas e comparadas são:

- **Análise superficial** - Esta variável possibilita a identificação de característica qualitativas do processo, podendo ser observados detalhes da usinagem, como marcas de avanço, rebarbas, material aderido, ocorrência de plowing, indícios de aresta postíça e outros defeitos como destacamentos de material, microvazios e presença de trincas. Tendo em vista que a peça estudada foi confeccionada por MADA esta análise possui ainda mais importância, uma vez que permite observar defeitos provenientes do processo de deposição e sua interação com a ferramenta durante o corte;
- **Rugosidade** - Variável que permite uma avaliação quantitativa da qualidade superficial, os parâmetros R_a , R_q e R_z são os mais utilizados na literatura e segundo (TODHUNTER et al., 2017) são parâmetros amplamente utilizados na indústria, o que permite a comparação dos parâmetros de corte utilizados neste trabalho com

a literatura. Além de que a avaliação combinada da rugosidade com as imagens da análise superficial favorece a interpretação mais precisa da qualidade obtida por cada condição de corte.

- Dureza - Medida através de teste de dureza do tipo Brinell é uma variável que permite avaliar se o processo de usinagem modificou as propriedades da peça, uma vez que durante o processo pode ter ocorrido aquecimento, o que ocasionaria uma variação na dureza, usualmente reduzindo. Além disso, se porventura ocorrer o aumento da dureza, é possível que além de influência térmica possa ter ocorrido encruamento, através da deformação plástica do material.

3.7.1 Análise Superficial

Para a análise superficial da peça utiliza-se o microscópio de medição 3D a laser LEXT OLS4100 da fabricante Olympus, representado na Fig. 25. Por meio deste equipamento faz-se possível observar na peça usinada se existe a presença de trincas na superfície do material estudado.



Figura 25 – Representação do equipamento utilizado - microscópio de medição LEXT OLS4100 (CM2P, 2022).

Assim como as demais etapas, esta deve ser efetuada antes de qualquer procedimento para verificar a existência ou não de trincas sobre o material estudado e também deve ser realizada logo após os processos de usinagem para averiguar se houve alguma alteração na quantidade de trincas sobre o material, que possam ser oriundas deste processo, além disso, verifica-se as características da superfície usinada. Para isso utiliza-se ampliações do microscópio nas escalas de 5000, 10000 e 20000 vezes.

3.7.2 Rugosidade

Para o processo de medição da rugosidade utiliza-se o rugosímetro portátil modelo SJ-201 da fabricante Mitutoyo, ilustrado na Fig. 26, para isso são coletados 3 parâmetros base o desvio aritmético médio (R_a), desvio médio quadrático (R_q) e altura máxima do perfil (R_z), a escolha destes parâmetros se deu pelo fato de serem amplamente utilizado nas análises de rugosidades de materiais, o que agiliza a interpretação do resultado e possíveis comparações com outros materiais. Também serão realizadas 5 medições no meio do canal, alinhando sempre com o avanço e coletando a média e desvio padrão, todas as medições seguiu-se a norma NBR 4287 (ABNT, 2002), que diz que por padrão a medição da rugosidade deve obedecer um cut-off de 0,8 mm, um comprimento de amostragem de 4 mm e utilizar do filtro de Gauss.



Figura 26 – Representação do equipamento utilizado - rugosímetro Mitutoyo SJ-201 (SEG, 2022).

3.7.3 Dureza

Para esta variável utilizou-se do equipamento durômetro Zwick Roell ZHU250, representado na Fig. 27. Assim como nos demais testes foram realizadas medições antes de qualquer procedimento e após cada processo realizado sobre a peça estudada. Esse equipamento consegue medir diversas escalas de dureza, sendo uma delas a dureza Brinell (HB), medida comumente utilizada nas pesquisas, então confecciona-se uma média dos valores obtidos de dureza da peça anterior ao processo de usinagem para que possa ser comparado com a média dos valores obtidos após os procedimentos realizado sobre a mesma.

O procedimento de coleta dos valor das dureza se deu pelo durômetro, neste equipamento há um penetrador com esfera de tungstênio com um diâmetro conhecido e uma força normalizada, e então pressiona-se a esfera sobre a superfície da peça estudada com uma força estabelecida a fim de promove a aparição da calota de Brinell, o diâmetro dessa calota é medido e relacionado com a carga que foi aplicada pelo equipamento, desta forma pode-se determinar a dureza por meio da Eq. 3.2

$$HB = \frac{F}{A_C} \quad (3.1)$$

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.2)$$

- HB - Dureza Brinell;
- F - Carga aplicada pelo equipamento;
- A_C - Área da calota esférica impressa no material ensaiado;
- D - Diâmetro da esfera;
- d - Diâmetro da calota.

Nesta medição foram realizadas 5 medições, no meio do canal, coletando a média e desvio padrão.

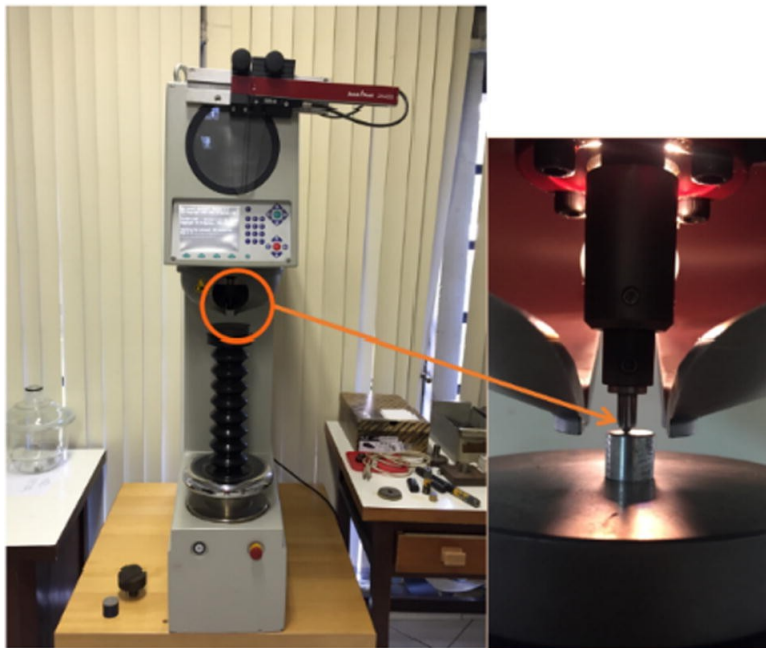


Figura 27 – Representação do equipamento utilizado - durômetro Zwick Roell ZHU250 (MACHADO; MALCHER, 2022).

4 Resultados e Discussões

Embora, como já mencionado, a ordem de coleta de resultado sobre os testes realizados tenha sido primeiramente coleta das imagens, seguido da rugosidade e por fim da dureza, para que se construa uma linha de entendimento mais concisa os resultados serão discutidos seguindo a ordem de rugosidade, seguido da análise superficial e por fim a dureza.

4.1 Rugosidade

Com o objetivo de realizar a análise da rugosidade da peça foram aferidas três medições em cada canal e na superfície da peça com os parâmetros (R_a), (R_q) e (R_z), na direção do avanço. Após as medições, para cada um dos cinco testes, foram calculados a média e desvio padrão (DP). Vale ressaltar que para o cálculo do desvio padrão foi considerado um intervalo de confiança de 95%.

Assim é possível apresentar os resultados coletados dos canais na Tab. 9, os parâmetros de cada teste estão ilustrado na Fig. 23. Com base nestes resultados, gerou-se os gráficos aqui presentes.

Tabela 9 – Valores de rugosidade dos canais estudados

	$R_a(\mu m)$		$R_z(\mu m)$		$R_q(\mu m)$	
Canal	Primário	Réplica	Primário	Réplica	Primário	Réplica
1° Teste	0,77	0,76	4,50	4,04	0,93	0,89
	0,81	0,81	3,78	4,29	0,94	0,99
	0,80	0,73	4,23	3,87	0,98	0,88
Média	0,79	0,77	4,17	4,07	0,95	0,92
DP	0,02	0,04	0,36	0,21	0,02	0,06
Canal	Primário	Réplica	Primário	Réplica	Primário	Réplica
2° Teste	0,48	0,71	3,29	4,17	0,6	0,89
	0,47	0,73	3,2	5,13	0,6	0,9
	0,5	0,61	3,28	3,3	0,63	0,74
Média	0,48	0,68	3,26	4,20	0,61	0,84
DP	0,02	0,06	0,05	0,92	0,02	0,09
Canal	Primário	Réplica	Primário	Réplica	Primário	Réplica
3° Teste	0,57	0,42	3,2	2,4	0,7	0,52
	0,52	0,45	2,82	2,92	0,65	0,55
	0,48	0,4	3,02	2,49	0,58	0,5
Média	0,52	0,42	3,01	2,60	0,64	0,52
DP	0,05	0,03	0,19	0,28	0,06	0,03
Canal	Primário	Réplica	Primário	Réplica	Primário	Réplica
4° Teste	0,48	0,66	3,1	4,24	0,61	0,85
	0,48	0,73	2,98	5,44	0,62	0,95
	0,56	0,68	4,82	4,05	0,76	0,85
Média	0,51	0,69	3,63	4,58	0,66	0,88
DP	0,05	0,04	1,03	0,75	0,08	0,06
Canal	Primário	Réplica	Primário	Réplica	Primário	Réplica
5° Teste	0,8	1,17	4,09	4,97	0,93	1,31
	0,84	0,99	4,4	5,21	1,02	1,17
	0,71	1,02	3,57	4,69	0,83	1,18
Média	0,78	1,06	4,02	4,96	0,93	1,22
DP	0,07	0,10	0,42	0,26	0,10	0,08
SUPERFÍCIE						
Superfície	2,95		19,1		3,72	
	3,21		24,8		4,05	
	3		21		3,85	
Média	3,05		21,62		3,87	
DP	0,14		2,92		0,17	

Os valores de rugosidade dos canais estudados e da superfície tanto de R_a , quanto de R_q e de R_z podem ser observados nas Fig. 28, 29, 30, 31, 32, 33. Nessas Figuras foram representados os dados dos valores médios da medições com os respectivos desvios padrões (DP) em forma de gráfico onde as colunas na cor azul (a esquerda) são medições realizadas nos canais primários e as colunas em verde (a direita) são dados dos canais réplicas.

Pelos gráfico da Fig. 28 é possível notar, como esperado, que em qualquer situação a rugosidade da peça após os ensaios de fresamento com os parâmetros de corte selecionados,

apresenta uma redução significativa em relação à superfície somente preparada, nestes ensaios essa redução pode chegar 86%.

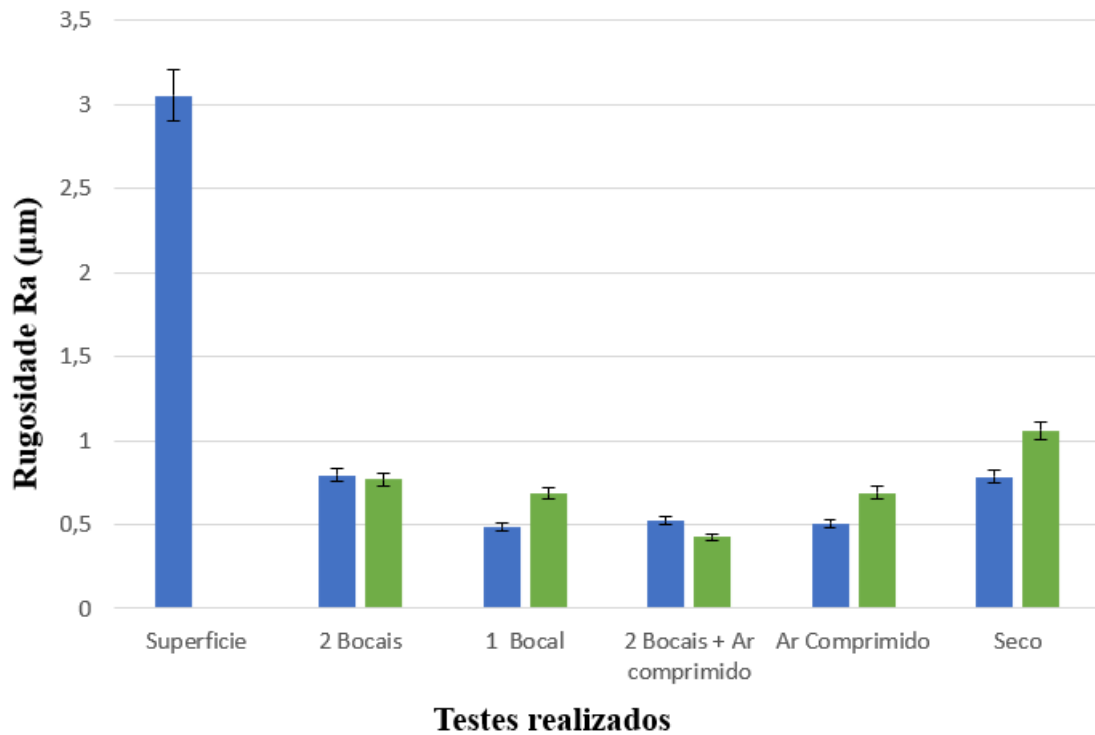


Figura 28 – Gráfico da Rugosidade Média (R_a) dos testes em comparação com a superfície.

Já na Fig. 29 pode-se observar com mais enfoque as diferenças e relações existentes dos resultados coletados dos testes aplicados, nota-se que o menor valor para rugosidade foi obtido no teste onde estavam atuando os dois bocais e o ar comprimido em conjunto, o que é interessante pois esperava-se que a atuação do ar comprimido no processo influenciasse de forma a retirar o fluido da área de corte e dessa forma atrapalhar a ação do fluido de corte sobre a ferramenta e a peça durante o processo e o maior valor para rugosidade foi obtido, como esperado pela literatura, no teste onde o canal foi usinado a seco.

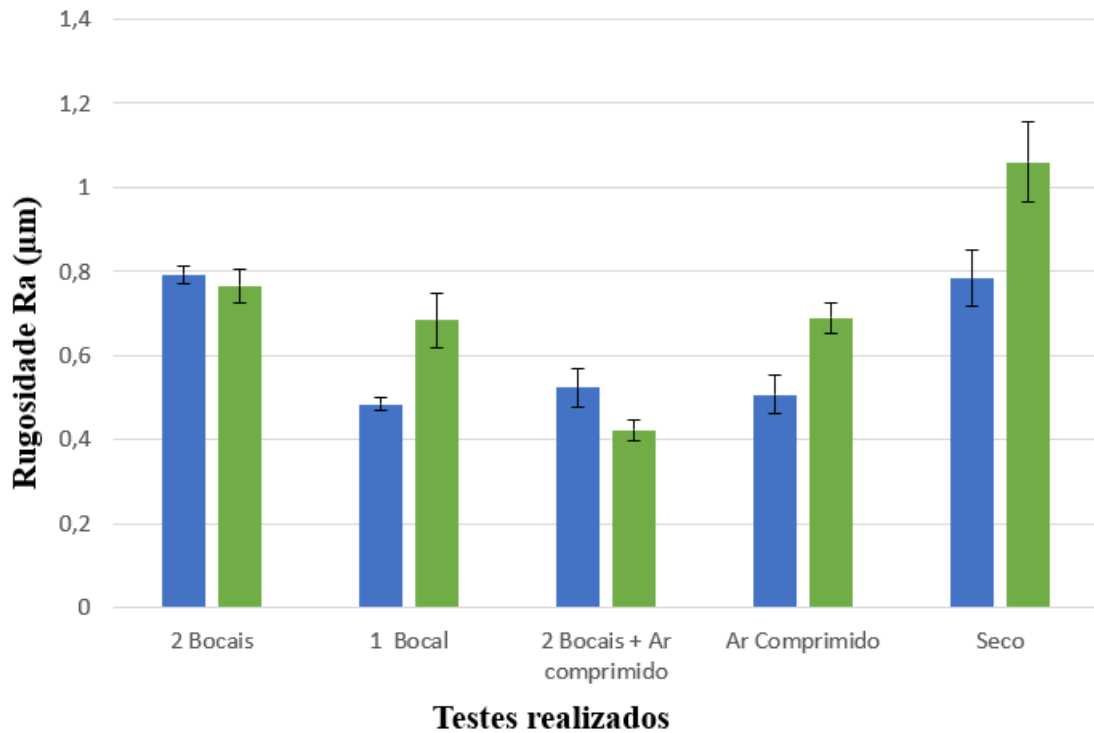


Figura 29 – Gráfico da Rugosidade Média (R_a) para os canais usinados.

Para R_q , tem-se na Fig. 30 os valores registrados para os canais em comparação ao valor da superfície, neste caso pode-se observar uma redução bem próxima aos valores de R_a , onde registrou uma diminuição dos valores de 68 a 86% dos canais que registraram maior e menor rugosidade comparado ao valor da superfície.

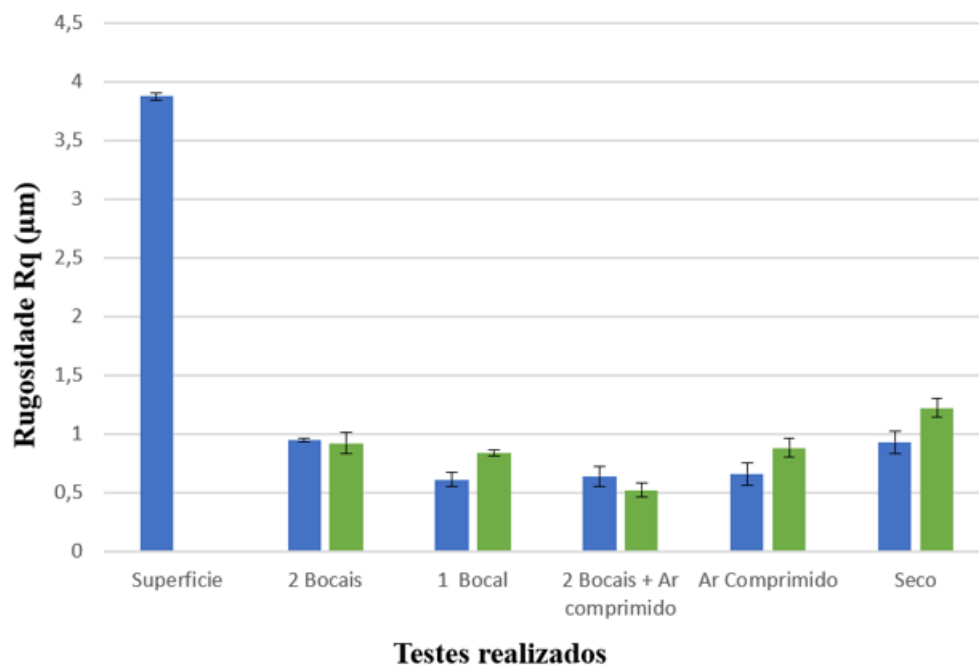


Figura 30 – Gráfico da Rugosidade Média (R_q) dos testes em comparação com a superfície.

Observando os resultados dos canais usinados de forma isolada na Fig. 31, pode-se

notar que assim como os casos de rugosidade para R_a , em R_q o menor valor registrado foi para o caso onde associou-se os 2 bocais e o ar comprimido, neste caso a rugosidade foi a mais baixa inesperadamente e o maior valor seguiu conforme a literatura sendo registrado no corte a seco.

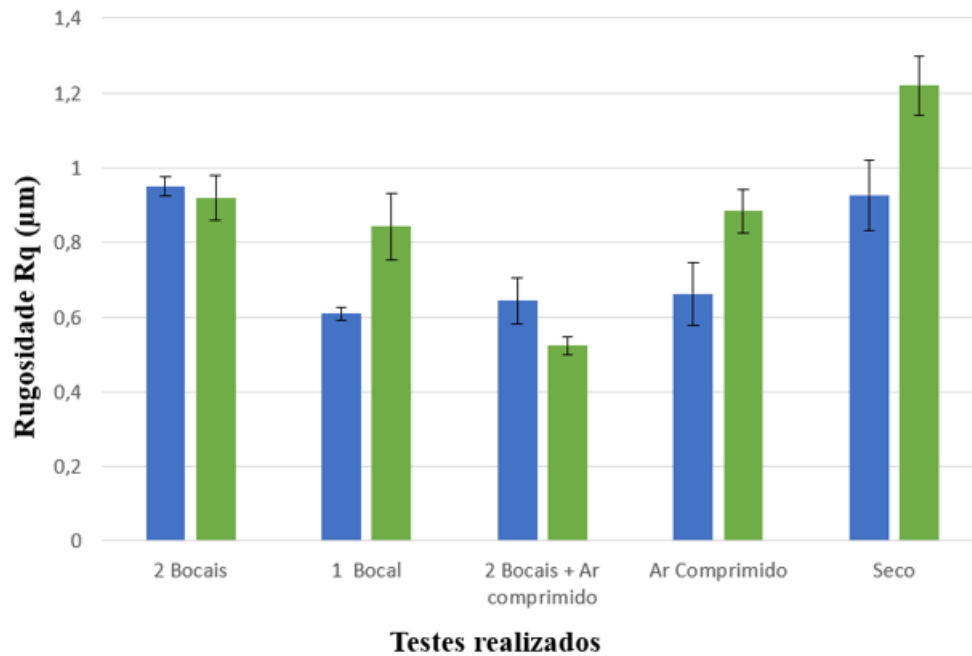


Figura 31 – Gráfico da Rugosidade Média (R_q) para os canais usinados.

Na Fig 32 também é possível notar a grande disparidade dos valores de R_z entre a superfície e os canais usinados, na redução de rugosidade para R_z , neste estudo pode-se registrar uma queda entre 77 e 88% para o valor mais alto e mais baixo dos canais, respectivamente, dentre os valores de rugosidade R_z foi o que registrou maior redução após o processo de usinagem.

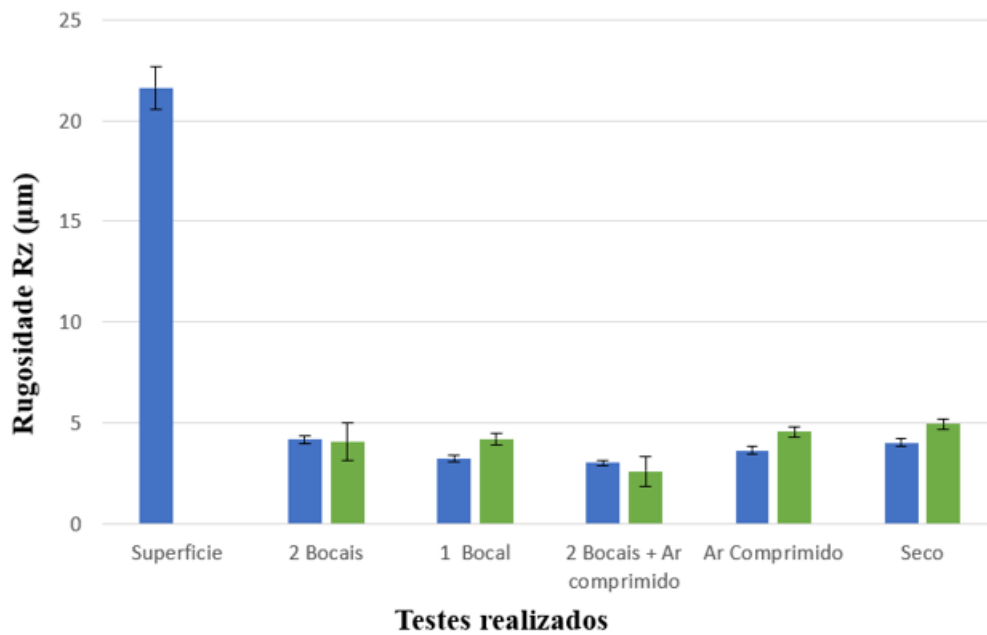


Figura 32 – Gráfico da Rugosidade Média (R_z) dos testes em comparação com a superfície.

Dando um foco para os testes realizados, pode-se observar na Fig. 33 que o comportamento dos canais usinados manteve-se igual aos demais valores de rugosidade, onde registrou o maior valor como esperado no corte a seco e também o menor valor no caso surpreendente do teste onde utilizou-se os 2 bocais e o ar comprimido associados.

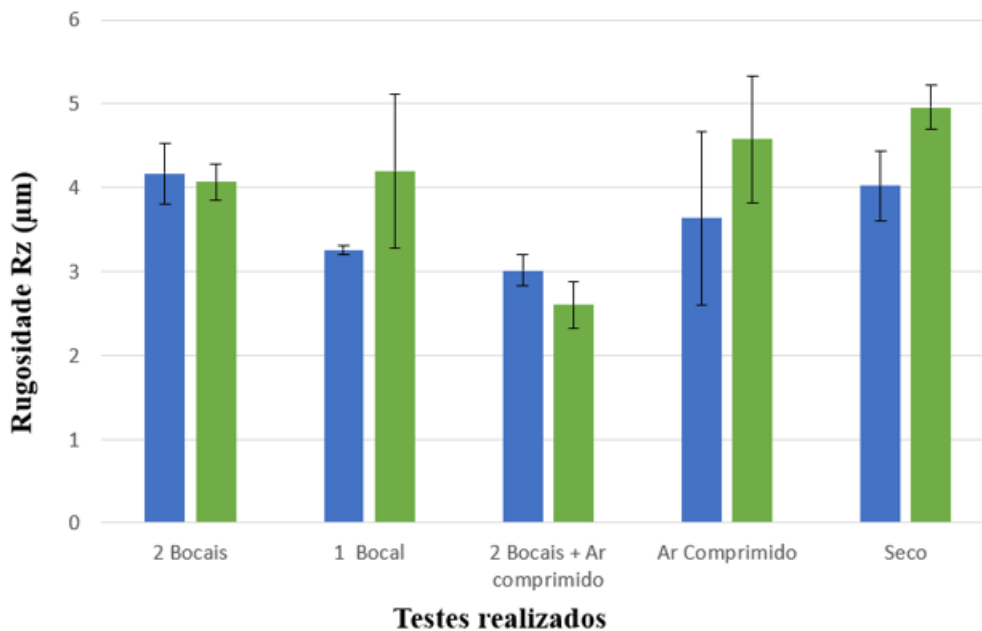


Figura 33 – Gráfico da Rugosidade Média (R_z) para os canais usinados.

Notoriamente a associação desses agentes (fluido de corte e ar comprimido) ocasionou um impacto diferente do que se esperava, isso pode ter ocorrido pois quando se trata de ferramentas rotativas sempre há em volta da mesma uma camada limite de fluxo. Este fluxo de ar impede que o fluido de corte entre em contato com a ferramenta, o que deve

fazer com que seu efeito não seja como esperado, neste caso presumisse que o ar comprimido que foi injetado juntamente com o fluido de corte tenha gerado uma turbulência na camada limite de ar da ferramenta, permitindo que o jorro de fluido, que não tem muita pressão, acessasse a região de corte de forma mais eficaz, podendo realizar canais com menores rugosidades.

Outro ponto importante para ser observado é o comportamento do teste onde atuavam 2 bocais, neste caso por ter tido maior presença de fluido de corte sobre o processo (20 l/min) esperava-se que os valores de rugosidade fossem os mais baixos dos testes, entretanto não foi bem o que aconteceu, pode-se notar que os valores do teste 1 são elevados quando comparado aos outros testes, assim como foi observado no estudo do autor Ribeiro (2023) onde a vazão menor de 10 l/min conseguiu obter melhores valores de rugosidade, entretanto quando observado a Fig. 36 e a Fig. 37 observa-se a marca na superfície do corte bem definida como esperado, é possível notar ausência de defeitos nos canais usinados, isso pois esse caso consegue retirar o material de forma mais eficaz, deixando marcas de avanço mais evidentes, enquanto os canais do teste com apenas 1 bocal não possuem marcas de avanço bem definidas e parece ter ocorrido um tipo de esmagamento do material em suas superfícies como observado na Fig. 38 e a Fig. 39, que podem ter interferido sobre a conclusão do valor da rugosidade.

Notou-se também que a superfície do material devido ao desvio médio aritmético de R_a coletado, de acordo com a norma NBR 8404 (ABNT, 1984), pode ser classificada como N 3, enquanto os canais usinados podem ser classificados como N 2, já que possuem uma rugosidade e uma variação da mesma menor.

4.2 Análise Superficial

A coleta de resultados dessa variável se deu por uma análise integral dos canais usinados, no entanto as imagens coletadas pelo microscópio retratam uma parcela do canal onde apresentam características a serem discutidas. Para um entendimento sobre as imagens apresentadas o esquema da Fig. 34 representa o sentido do avanço e direção de corte obtidos nos canais usinados. Já para efeitos comparativos a Fig. 35 é uma imagem capturada da superfície não usinada da peça estudada, onde é possível notar as divisões das camadas depositadas.

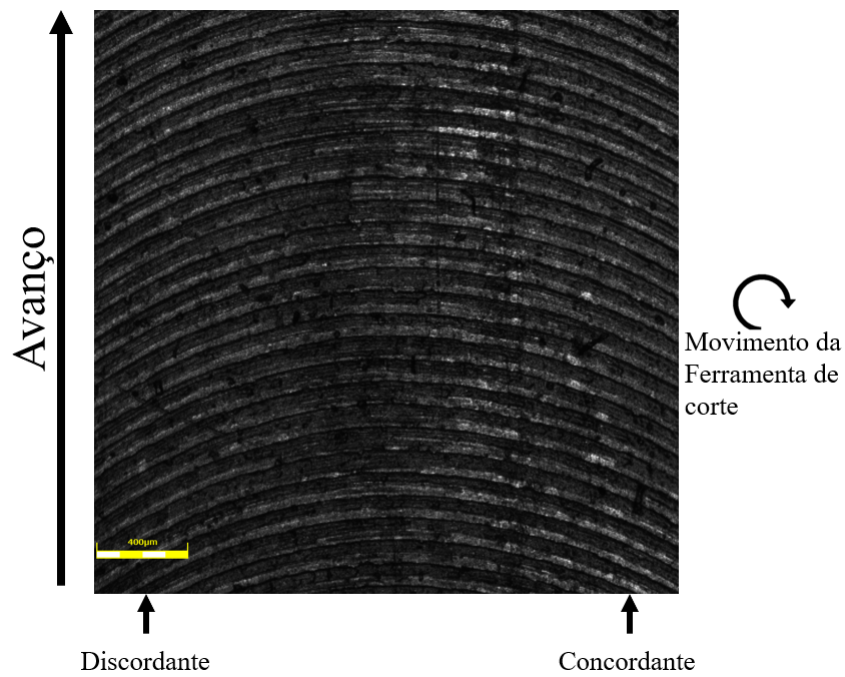


Figura 34 – Representação esquemática dos canais

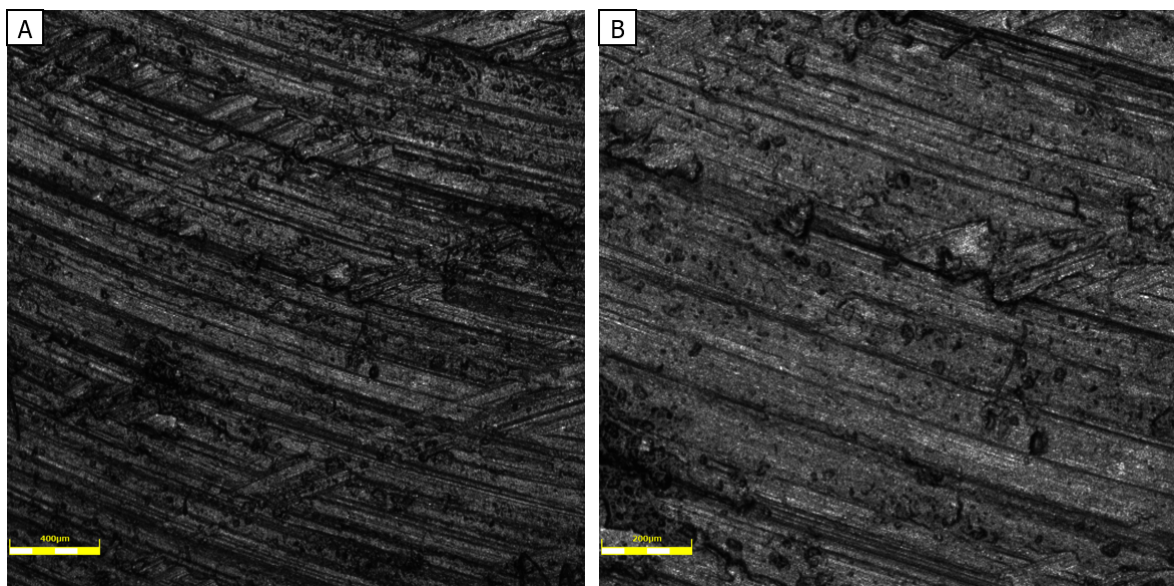


Figura 35 – A) Imagem em 20000x de uma região arbitrária da superfície da peça, B) Imagem da réplica da superfície da peça.

A Fig. 36 e 37 respectivamente, são imagens coletadas com ampliação de 5000x e 20000x do primeiro teste realizado, a escala utilizada para as ampliações das imagens desse projeto foram respectivamente $400\ \mu\text{m}$ e $100\ \mu\text{m}$, onde foi aplicado um jato de fluido lubri-refrigerante por 2 bocais com uma vazão de 20 l/min.

Embora esperava-se os menores valores de rugosidades para o teste 1, justamente por ter sido o teste com maior incidência de fluido lubri-refrigerante sobre a área usinada, onde haviam dois bocais injetando 20 l/min de fluido sobre a peça estudada, os resultados

coletados deste teste quando comparado aos demais canais usinados contrariou a expectativa. A Tab. 9 demonstrou que os casos do teste 1 resultaram em canais com rugosidades inferiores quando comparado entre os demais canais que tiveram a presença do fluido de corte, porém ao analisar a imagem dos canais nota-se marcas de usinagem homogêneas e nenhuma presença de defeito pelo canal, esse fator demonstra que o processo de usinagem sobre a peça ocorreu de forma bem sucedida e que este teste não obteve resultados ruins e sim resultados esperados.

Nas imagens Fig. 36 e 37 pode-se perceber que as marcas do avanço da ferramenta de corte estão presentes e homogêneas, demonstrando que o processo de fresamento foi realizado com êxito.

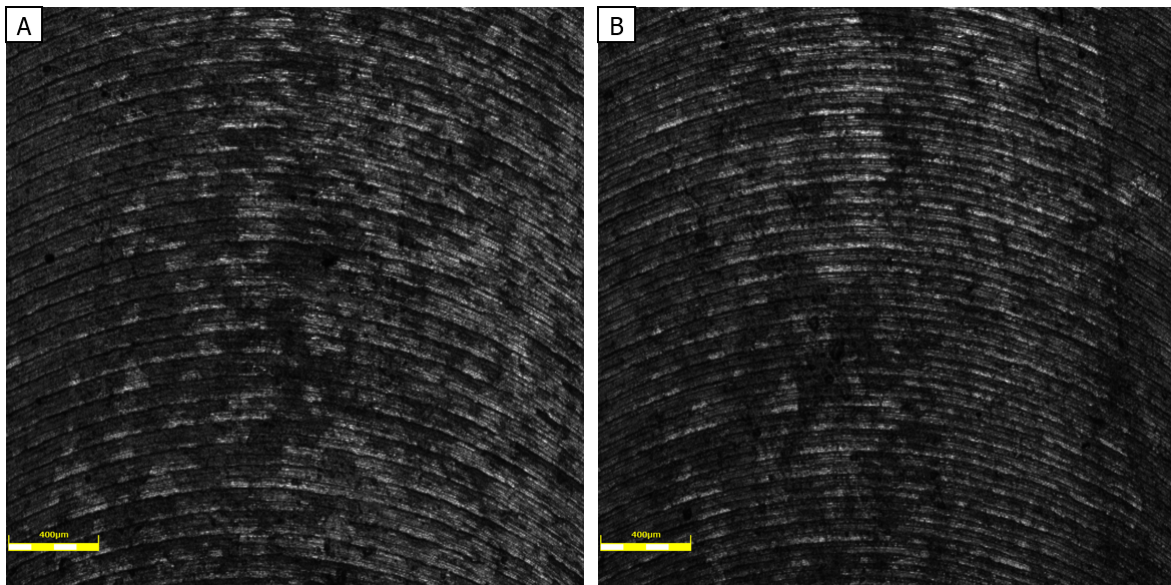


Figura 36 – A) Imagem em 5000x do canal do primeiro teste com 2 bocais injetando fluido lubri-refrigerante, B) Imagem da réplica do primeiro teste.

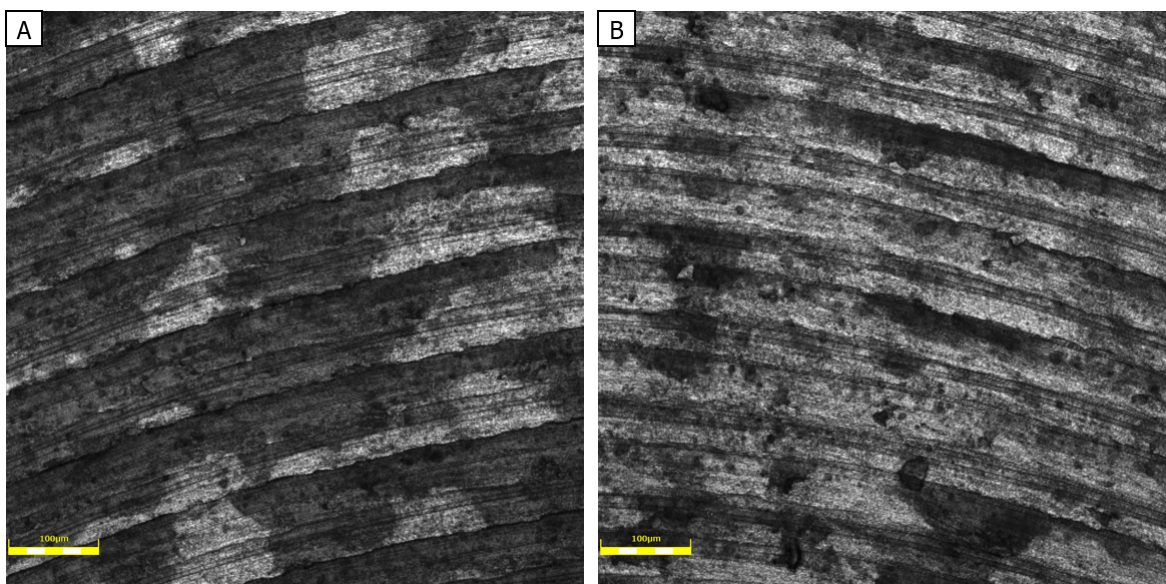


Figura 37 – A) Imagem em 20000x do canal do primeiro teste com 2 bocais injetando fluido lubri-refrigerante, B) Imagem da réplica do primeiro teste.

Para o teste 2, onde utilizou-se apenas 1 bocal para injeção de fluido sobre o canal usinado com uma vazão de 10 l/min as Fig 38 e 39 foram coletadas. Nestas imagens é possível observar as marcas de avanço da ferramenta sobre o canal usinado, porém aparentam estar achatadas o que resultou em valores de rugosidade e dureza mais baixos.

Ao realizar a análise superficial da peça fica claro que o processo de fresamento do teste 2, embora tenha tido rugosidades menores do que os do teste 1, não ocorreu perfeitamente para o primeiro canal (A). Nas Fig 38 e 39 é possível notar que o primeiro canal (A) não possui marcas da ferramenta de corte bem definidas e na Fig. 39 (A), em especial, pode observar que houve um achatamento das bordas dos canais, o que gerou o valor mais baixo para a rugosidade, neste caso o processo de fresamento não retirou material de forma adequada diferentemente do teste 1. Porém pode-se observar também que no canal de réplica (B) as marcas da ferramenta ficaram bem definidas e por consequência esse canal obteve resultados de rugosidade muito próximos ou melhores do que os canais dos teste 1, algo que não era esperado, haja visto que neste teste a quantidade de fluido lubri-refrigerante incidente sobre o processo é menor, acredita-se que isso pode ter ocorrido devido a heterogeneidade da estrutura da peça, que foi fabricada por MADA, processo com grandes gradientes térmicos, e não passou por tratamento térmico antes da usinagem.

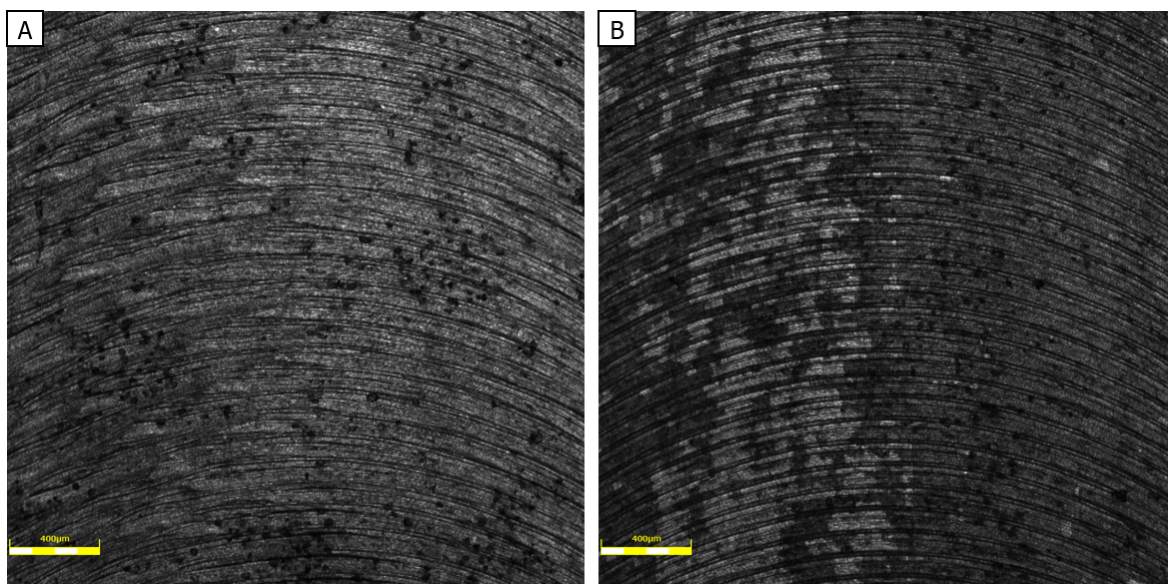


Figura 38 – A) Imagem em 5000x do canal do segundo teste com 1 bocal injetando fluido lubri-refrigerante, B) Imagem da réplica do segundo teste.

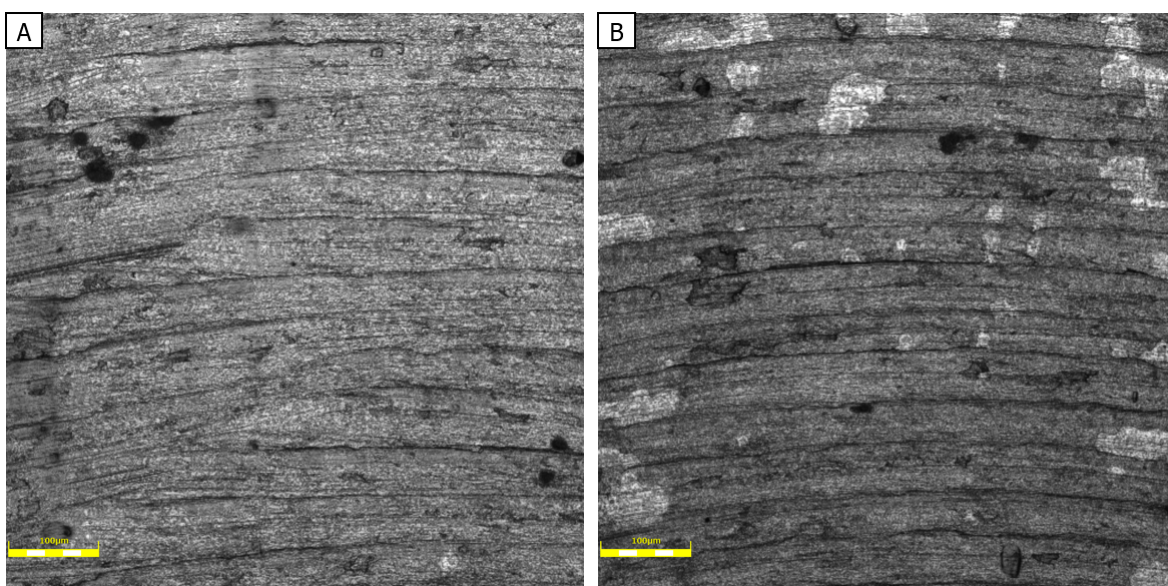


Figura 39 – A) Imagem em 20000x do canal do segundo teste com 1 bocal injetando fluido lubri-refrigerante, B) Imagem da réplica do segundo teste.

Para o teste 3, como já abordado anteriormente, foi um teste que registrou valores de rugosidade surpreendentes e ao analisar a superfície dos canais do teste 3 foi possível coletar as Fig. 40 e 41. É possível notar que diferentemente do teste 2 o teste 3 ainda consegue possuir marcas bem definidas do avanço da ferramenta de corte e também não há presença de defeitos no canal usinado, é importante frisar que as marcas que estão presentes na Fig. 41 (A) aparentemente são sombras de impurezas presente na peça e não poros ou defeitos, isso demonstra que sua rugosidade baixa não advém de um subproduto do processo de fresamento como o achatamento dos canais como no teste 2 e sim por uma melhor interação entre ferramenta de corte e peça.

Acredita-se na ideia de que a associação do ar comprimido ao fluido de corte possibilitou o rompimento do bolsão de ar que se forma ao redor da ferramenta de corte durante o processo de usinagem.

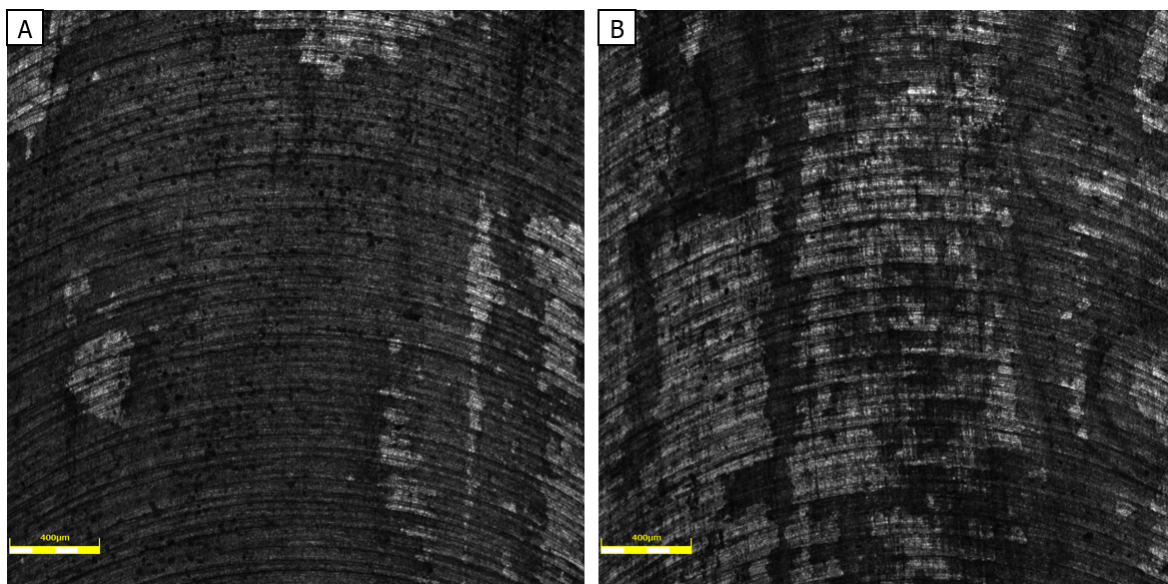


Figura 40 – A) Imagem em 5000x do canal do terceiro teste com 2 bocais injetando fluido lubri-refrigerante e 1 injetando ar comprimido, B) Imagem da réplica do terceiro teste.

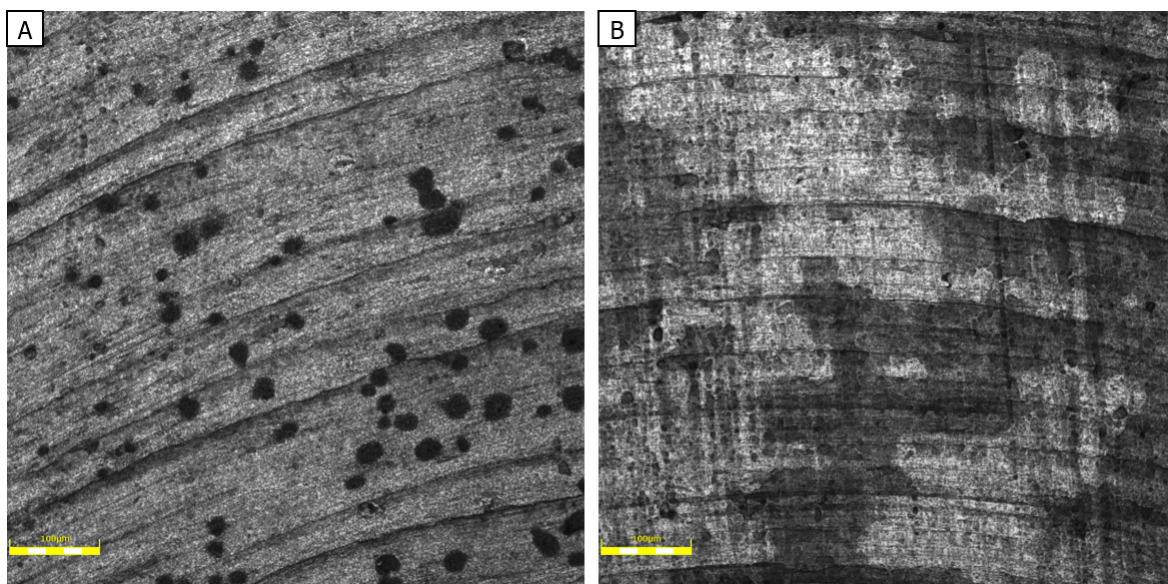


Figura 41 – A) Imagem em 20000x do canal do terceiro teste com 2 bocais injetando fluido lubri-refrigerante e 1 injetando ar comprimido, B) Imagem da réplica do terceiro teste.

Para o teste 4, onde utilizou-se apenas de ar comprimido, foi possível registrar as Fig. 42 e 43, neste teste pode-se observar alguns pontos importantes como o fato de que a falta de lubrificação durante o processo incide diretamente na qualidade da peça, já que o ar comprimido atua mais realizando o resfriamento do processo e não a lubrificação

então já era esperado devido a literatura resultados de rugosidade alta e um acabamento superficial mais pobre quando comparado aos demais.

Aqui no teste 4 fica mais fácil de observar o efeito plowing efeito comum em materiais dúcteis ou em processos com avanço pequeno, segundo Oliveira e Rodrigues (2015) esse efeito ocorre quando a espessura do cavaco não deformado é menor que espessura mínima necessária (h_{min}) para a formação do cavaco, então o material é submetido a deformação elastoplástica ou plowing, e não ocorre a remoção efetiva de material. O que dá o efeito de achatamento das bordas dos canais visíveis na Fig. 43 (B).

Outro fato interessante presente neste teste é a variação observada entre as superfícies do canal de ensaio e da réplica, isso pode ter ocorrido por duas razões pode ser oriundo da heterogenia da estrutura da peça que advém do seu processo de fabricação ou pode ter ocorrido devido ao desgaste da ferramenta durante o processo de fresamento. Haja visto que a ferramenta de corte é uma ferramenta de metal duro revestido com nitreto de titânio alumínio possuindo uma ótima resistência e também pelo fato do canal da réplica, procedimento realizado após o ensaio, ser o com maior nitidez quanto às marcas de avanço e com resultados de rugosidade mais compatíveis com a literatura, acredita-se que o real fator para essa diferença entre as superfícies seja a heterogenia da estrutura da peça.

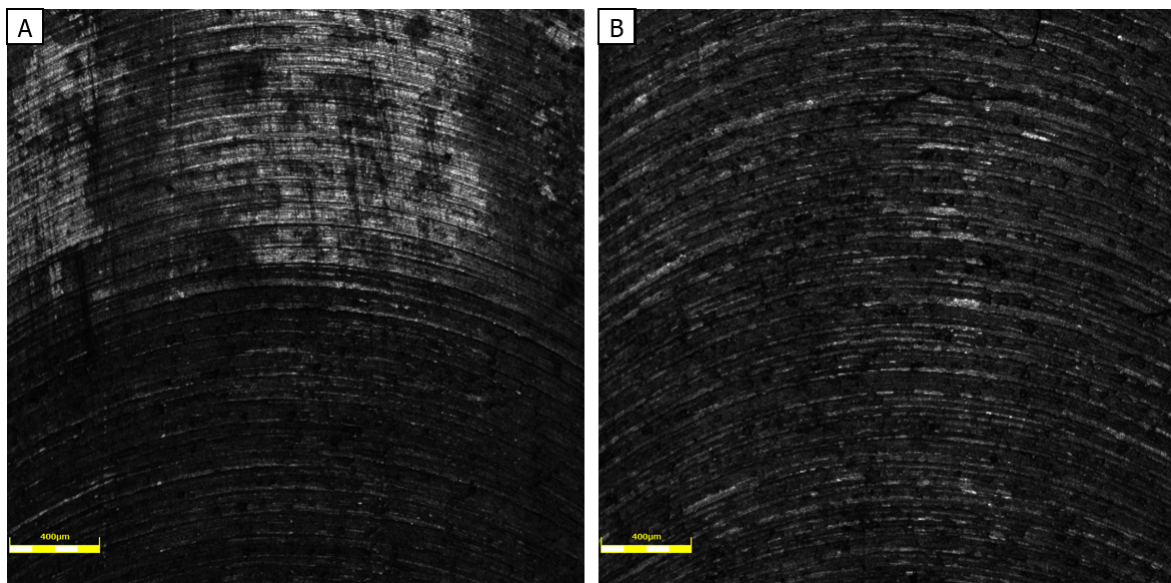


Figura 42 – A) Imagem em 5000x do canal do quarto teste com ar comprimido, B) Imagem da réplica do quarto teste.

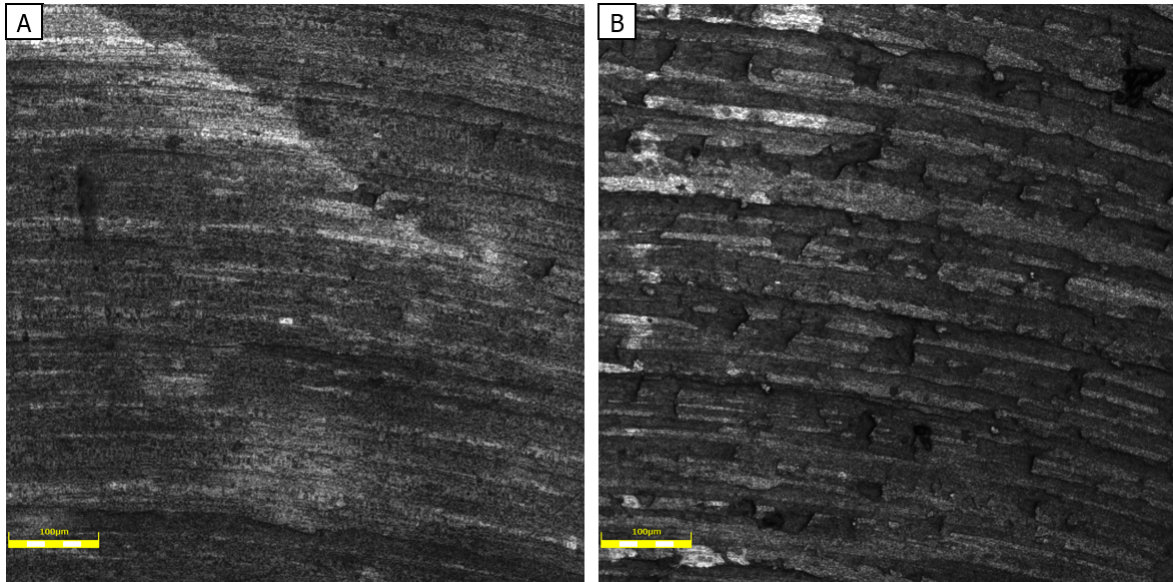


Figura 43 – A) Imagem em 20000x do canal do quarto teste com ar comprimido, B) Imagem da réplica do quarto teste.

Por fim para o teste 5 foi coletado as Fig. 44 e 45, nestas figuras pode-se observar algo incomum e em desacordo com a literatura, para o teste a seco esperava-se que as marcas de avanço não ficassem nítidas e bem marcadas, coisa que não aconteceu como observado na Fig. 44, porém na Fig. 45 é possível observar defeitos na superfície como escorregamento de material, interrompimento de corte e também a presença do efeito plowing, assim como no teste 4, como visto na Fig. 46, esses defeitos na estrutura e a alta rugosidade são fatores que vão de acordo com a literatura e já eram esperados.

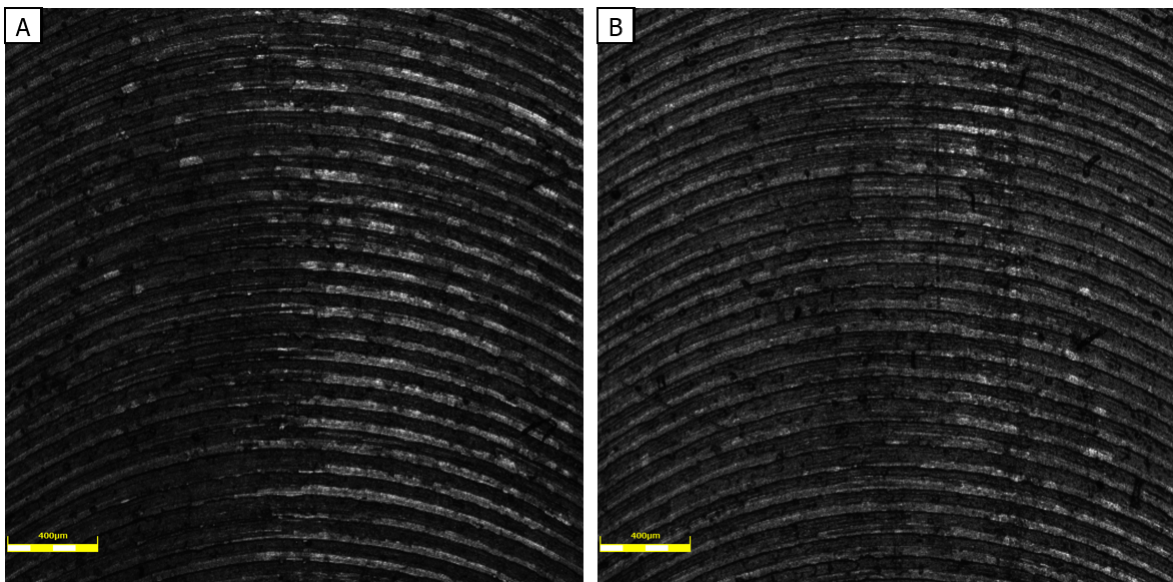


Figura 44 – A) Imagem em 5000x do canal do quinto teste, teste a seco, B) Imagem da réplica do quinto teste.

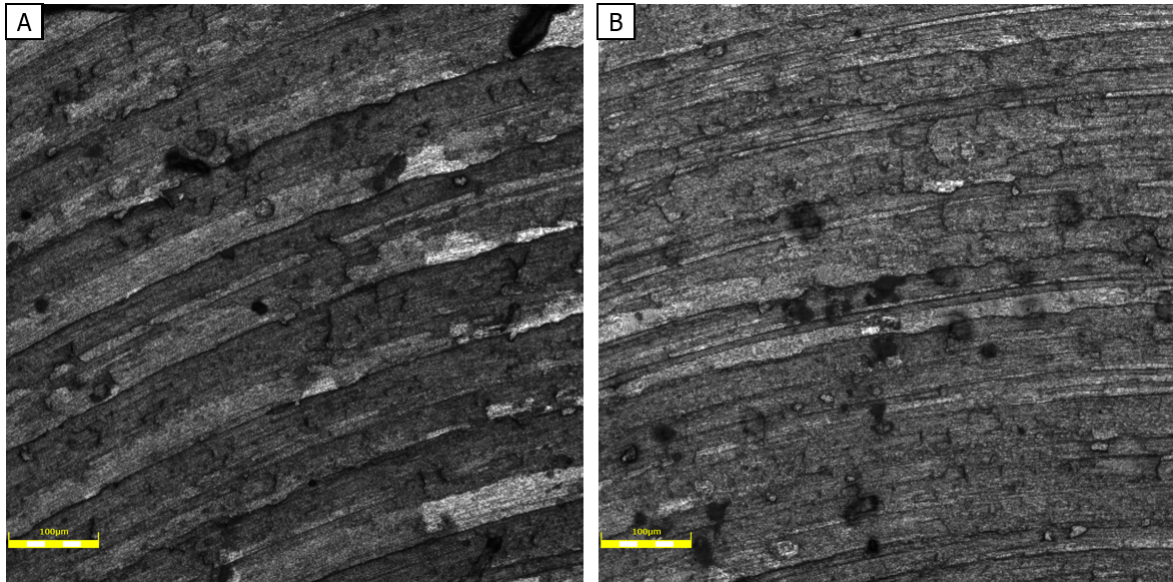


Figura 45 – A) Imagem em 20000x do canal do quinto teste, teste a seco, B) Imagem da réplica do quinto teste.

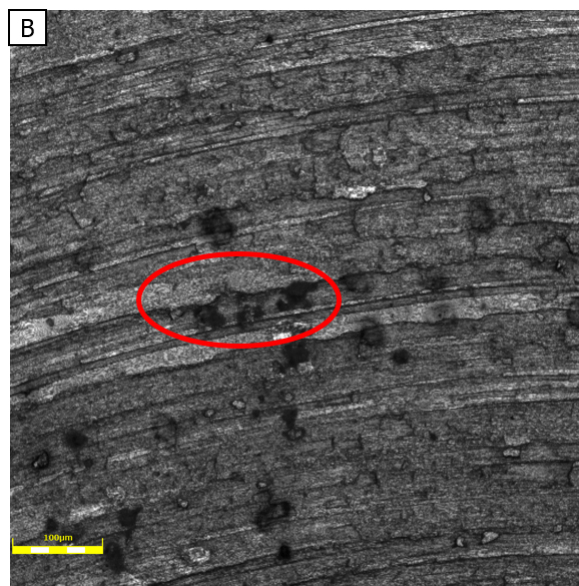


Figura 46 – Defeito na superfície (Plowing).

Nota-se que a ferramenta de corte influenciou positivamente durante os testes, mesmo que tenha ocorrido alguns defeitos como arrancamento de material e plowing sobre os canais usinados, é possível notar que diferentemente do trabalho de Barreto (2022) a presença de defeitos nos canais foi mitigada, além da ausência da marca da ferramenta no centro do canal como foi demonstrado na Fig. 16. Embora no trabalho de Torres (2022) tenha sido usinado uma peça de Inconel 718, é interessante observar a influência da velocidade de corte sobre as marcas de avanço na superfície, foi possível notar uma maior constância das marcas de avanço de corte da ferramenta sobre a superfície quando comparado as imagens coletadas no trabalho de Torres (2022), esse fator pode ser

atribuído aos parâmetros brandos utilizado nesta usinagem, como a velocidade de corte de 10 m/min, já que Torres (2022) utilizou velocidades de corte de 30 e 100 m/min.

4.3 Dureza

Por fim, a última variável analisada foi a dureza do tipo Brinell, como mencionado anteriormente a escolha dessa dureza em relação às demais se deu pelo seu grande uso nas pesquisas, o que possibilita a comparação dos valores obtidos com outros estudos. Assim como as outras variáveis a dureza foi coletada na superfície do material e nos canais realizados, mas diferente das outras variáveis a dureza foi realizado por último justamente pelo fato dela marcar o material o que poderia interferir nas demais variáveis.

Os valores coletados das durezas estão registrados na Tab. 10 e plotados em forma de gráfico na Fig. 47 e Fig. 48

Tabela 10 – Valores de dureza Brinell dos canais estudados.

Canal	Dureza			Média	DP
1	130,00	128,30	126,80	128,40	1,60
2	132,20	127,70	129,30	129,70	2,28
3	126,20	128,60	125,90	126,90	1,48
4	124,50	126,40	125,10	125,33	0,97
5	131,88	134,00	130,60	132,16	1,72
6	131,80	128,20	128,50	129,50	2,00
7	126,70	128,80	127,60	127,70	1,05
8	130,20	131,30	133,60	131,70	1,73
9	130,20	128,50	130,30	129,67	1,01
10	129,90	130,60	125,60	128,70	2,71
Superfície	138,00	138,90	139,20	138,70	0,62

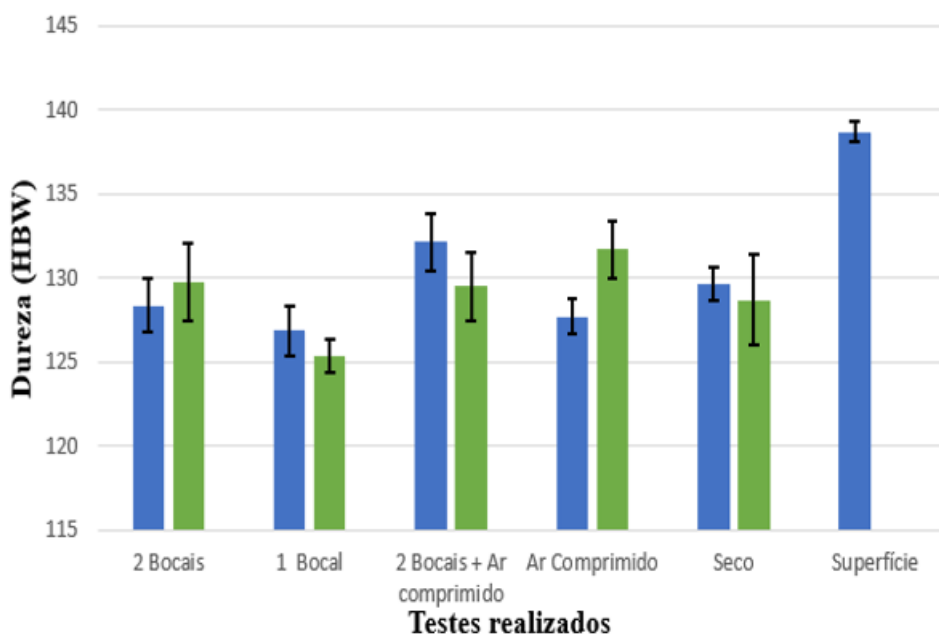


Figura 47 – Gráfico da dureza registrada nos canais e na superfície da peça.

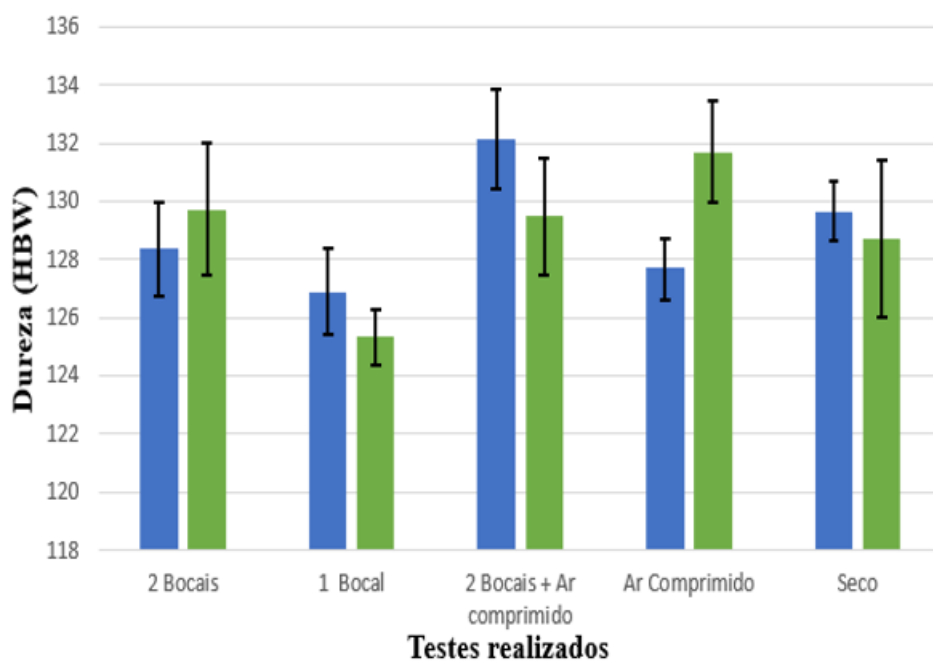


Figura 48 – Gráfico da dureza registrada apenas nos canais usinados.

Ao analisar os resultados obtidos observa-se que o caso que reduziu mais a dureza da peça durante o processo de fresamento foi o canal 4, onde usinou-se a peça apenas com 1 bocal de fluido lubri-refrigerante injetando-o a uma vazão de 10 l/min, este canal embora tenha tido uma rugosidade baixa foi observado que o fresamento não ocorreu da melhor forma possível, não possuindo marcas de avanço bem definidas em sua superfície e muita presença de efeito plowing pela sua superfície e por fim registrou uma diminuição de 10% do valor da dureza da peça original, isso leva a acreditar que a vazão de fluido refrigerante sobre a peça confeccionada por MADA não foi o suficiente.

Já para o caso de 2 bocais injetando fluido mais 1 bocal injetando ar comprimido obteve-se valores de rugosidade baixos, possui uma superfície com marcas de avanço bem definidas e sem a presença de defeitos e registrou uma redução de apenas 5% do valor da dureza da superfície da peça original, isso demonstrou que o caso de injeção de fluido a jorro baixo mais a associação do ar comprimido culminou em ótimos resultados.

Uma observação importante a cerca da dureza deste material pode ser tirada quando comparado a dureza coletada neste estudo com o estudo de Ávila (2022), onde o autor focou no acabamento das peças impressas com arame ER70S-6 variando alguns parâmetros de fresamento dentre eles a velocidade de corte.

A dureza da superfície da peça de Ávila (2022) foi registrada como 159,07 HB e seu canal usinado com velocidade igual a deste trabalho de 10 m/min registrou uma média de 146,87 HB, dureza maior do que a própria superfície da peça analisada neste estudo, esse fator demonstra a heterogeneidade presente em peças confeccionadas por MADA. Pode-se observar uma redução de dureza média dos canais usinados pelo autor Ávila (2022) de 7,5% quando mantido padrões semelhantes ao teste 1 realizado no presente estudo, isso pode ser atribuído tanto ao posicionamento dos bocais, já que o autor Ribeiro (2023) observou a influência do posicionamento dos mesmos, quanto a diferente ferramenta de corte utilizada, uma vez que o autor Ávila (2022) utilizou uma ferramenta de aço rápido sem revestimento e neste estudo foi utilizada uma de Metal duro revestido com nitreto de titânio alumínio.

5 Conclusões

Nesse estudo foram realizados ensaios do processo de fresamento do arame ER70S-6 com diferentes atmosferas lubri-refrigerantes. Após a realização dos ensaios e análise dos resultados, em relação a análise superficial, rugosidade e dureza da peça, pôde-se obter as seguintes conclusões:

- A atmosfera que proporcionou melhor acabamento para a peça usinada foi a atmosfera do teste 3, 2 bocais de fluido de corte com uma vazão de 20 l/min e um bocal injetando ar comprimido, a rugosidade registrada foi de $R_a = 0,47 \mu m$, $R_q = 0,58 \mu m$ e $R_z = 2,81 \mu m$, menores valores entre todos os ensaios. A superfície possuía marcas de avanço bem definidas e não possuía defeitos visíveis. Além disso, resultou no maior valor para a dureza 130,83 HBW, apenas 5,5% de redução, em relação à antes da usinagem.
- O teste com 1 bocal de fluido de corte, 10 l/min, ocorreu de forma inesperada já que apresentou uma superfície com acabamento relativamente ruim, $R_a = 0,78 \mu m$, $R_q = 0,94 \mu m$ e $R_z = 4,12 \mu m$. Além disso, resultou em uma redução de 7% da dureza original da peça. O canal registrou a maior redução de dureza da peça, ficando com o valor médio de 126,12 HBW, ou seja, 9% de redução.
- O teste com 2 bocais de fluido de corte, 20 l/min, apresentou bom acabamento superficial qualitativo, porém rugosidades elevadas, possuindo valores médios de $R_a = 0,58 \mu m$, $R_q = 0,73 \mu m$ e $R_z = 3,73 \mu m$.
- Para o teste somente com ar comprimido, obteve-se os resultados de rugosidade $R_a = 0,60 \mu m$, $R_q = 0,77 \mu m$ e $R_z = 4,11 \mu m$. Esses valores são próximos ou mais baixos que o teste 1, com máxima vazão de fluido, no entanto essa rugosidade se deu pela grande presença de defeitos tipo plowing na superfície, que diminuem a amplitude das marcas de avanço. Em relação à dureza houve uma redução de 6,5% em relação à superfície da peça original.
- A usinagem a seco resultou em valores de rugosidade de $R_a = 0,92 \mu m$, $R_q = 1,07 \mu m$ e $R_z = 4,49 \mu m$. Apesar dos altos valores de rugosidade a superfícies possuíam marcas do avanço bem definidas e não foram identificados defeitos. Sua dureza registrada foi de 129,18 HBW, aproximadamente 7% de redução como no teste 1.

5.1 Trabalhos futuros

Visando a ampliação dos resultados deste trabalho, os seguintes trabalhos futuros são sugeridos:

- Analisar o comportamento do processo com um aumento dos parâmetros de corte, em especial a velocidade de corte;
- Analisar a influência sobre um peça tratada termicamente;
- Analisar o comportamento de um fresamento com canais paralelos à direção de deposição do material;
- Analisar o desgaste da ferramenta após cada canal.

Referências

ABNT, A. B. N. T. NBR 6175 - Processos mecânicos de usinagem. *ABNT*, v. 1, p. 1–3, 1971. Citado na página 4.

ABNT, A. B. N. T. NBR 4287 - Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos - Procedimento. *ABNT*, v. 1, p. 1–10, 1984. Citado na página 40.

ABNT, A. B. N. T. NBR 6162 - Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais. *ABNT*, v. 1, p. 1–37, 1989. Citado 4 vezes nas páginas v, 6, 7 e 8.

ABNT, A. B. N. T. NBR 12545 - Conceitos da técnica de usinagem - forças energia trabalho e potencias. *ABNT*, v. 1, p. 1–3, 1991. Citado 3 vezes nas páginas v, 10 e 11.

ABNT, A. B. N. T. NBR 4287 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. *ABNT*, v. 1, p. 1–18, 2002. Citado na página 32.

ALBERTI, E. A.; BUENO, B. M. P.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Processamento de ligas de níquel com técnica de manufatura aditiva utilizando plasma por arco transferido. *Jornal Inspeção*, p. 1, 2015. Citado 2 vezes nas páginas v e 17.

ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J. da; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. *Jornal Inspeção*, p. 1, 2014. Citado na página 17.

ANDRE, V. D. Avaliação da influência dos parâmetros de corte e duas classes de ferros fundidos vermiculares na temperatura de usinagem. *Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia*, p. 1–3, 2017. Citado na página 12.

BARRETO, T. de S. M. Estudo das características de usinagem de peças metálicas obtidas por manufatura aditiva a arco. *Universidade de Brasília, UnB, Brasília*, p. 34–36, 2022. Citado 8 vezes nas páginas vi, viii, 19, 20, 24, 26, 27 e 48.

BIOLUB, Q. L. *BIO 100 E - Óleo Solúvel Sintético Biodegradável*. 2022. Data de acesso: 07/09/2022. Disponível em: <<https://biolub.com.br/oleos-soluveis-sinteticos/bio-100e>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 29 e 30.

BÖHLER, W. *Böhler sg 2. Solid wire, mild steel*. 2022. Data de acesso: 04/09/2022. Disponível em: <http://www.vabw-service.com/documents/boehler/datenblaetter/en/L1_16699_en__BOEHLER_SG_2_3U10B20G_3291525__EN.pdf?cache=1648417168>. Citado 4 vezes nas páginas vii, viii, 22 e 62.

CADIUM. *O que é micro lubrificação (MQL)? Conheça os prós e contras*. 2022. Data de acesso: 02/08/2022. Disponível em: <<https://cadium.com.br/o-que-e-micro-lubrificacao-mql-conheca-os-pros-e-contras/>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 16.

CARVALHO, C. S.; MENEZES, M. S. de; WILL, C. R.; FILHO, J. M. D. de S.; RANIERI, K. Caracterização mecânica e inspeção radiográfica de uma luva de redução metálica fabricada por mada (waam). *Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva*, p. 1–11, 2020. Citado 2 vezes nas páginas v e 18.

CIMM. *Fluidos de corte solucionam problemas da usinagem*. 2010. Data de acesso: 11/07/2022. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6777-fluidos-de-corte-solucionam-problemas-da-usinagem>. Citado 2 vezes nas páginas v e 12.

CM2P. *Equipment for characterization and analysis of forged products*. 2022. Data de acesso: 08/09/2022. Disponível em: <<https://www.cm2p.ca/equipements/>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 31.

CRISPIM, C. T. *Evolução da usinagem de peças: Como a indústria brasileira está avançando*. 2022. Data de acesso: 11/09/2022. Disponível em: <<https://www.senai-ce.org.br/blog/evolucao-da-usinagem-de-pecas-como-a-industria-brasileira-esta-avancando/>>. Citado na página 1.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Brasil: Editora ARTLIBER LTDA, 2001. Citado 5 vezes nas páginas 4, 6, 10, 13 e 14.

FLUVISERRA. *Fresamento sem refrigeração ou com fluido de corte*. 2022. Data de acesso: 02/08/2022. Disponível em: <<https://fluviserra.com/en/technology/>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 15.

FORTES, C. *Soldagem MIG/MAG*. São Paulo: ESAB - Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget, 2005. Citado na página 17.

GE, J.; LIN, J.; FU, H.; LEI, Y.; XIAO, R. A spatial periodicity of microstructural evolution and anti-indentation properties of wire-arc additive manufacturing 2cr13 thin-wall part. *Materials Design*, v. 160, p. 218–228, 2018. ISSN 0264-1275. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127518307159>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 1.

GMBH, F. I. *Camada por camada fabricação econômica de componentes metálicos wire arc additive manufacturing*. 2022. Data de acesso: 01/09/2022. Disponível em: <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil/tecnologia-de-soldagem/centro-de-informcoes/revista/2019/waam>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 19.

HACKENHAAR, W. Estudo das propriedades mecânicas e do resfriamento em manufatura aditiva por deposição a arco. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Rio Grande do Sul*, p. 1, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 1, 3, 16, 17 e 19.

HIOKI, D. Influência dos parâmetros de corte do fresamento hsm sobre o desempenho tribológico do aço aisi h13 endurecido. *Escola Politécnica, Université de São Paulo, São Paulo*, p. 42–50, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 5, 6 e 7.

JHAVAR, S.; JAIN, N.; PAUL, C. Development of micro-plasma transferred arc (-pta) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 5, p. 1102–1110, 2014. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613003920>>. Citado na página 2.

- KLOCKE, F. *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Berlin: Springer, 2009. Citado na página 14.
- LUMINOSO, L. *Large-part Additive Manufacturing*. 2022. Data de acesso: 18/09/2022. Disponível em: <<https://www.canadianmetalworking.com/canadianfabricatingandwelding/article/fabricating/large-part-additive-manufacturing>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 2.
- MACEDO, S. E. M. Análise de forças no fresamento de topo convencional e com altas velocidades de corte. *Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina*, p. 15–24, 2001. Citado 3 vezes nas páginas v, 9 e 10.
- MACHADO, L.; MALCHER, L. *Isotropic hardening curve characterization by the resultant profile of ball indentation tests*. 2022. Data de acesso: 08/09/2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-019-1976-4/figures/12>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 33.
- MACHADO Álisson R.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. da; COELHO, R. T. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Brasil: Blucher, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 6, 7, 11, 12, 13 e 15.
- MADRAS. *Super CNC Vertical Machining Centre (XH7132)*. 2022. Data de acesso: 05/09/2022. Disponível em: <www.mtt.net.in>. Citado 4 vezes nas páginas vii, viii, 26 e 63.
- MITSUBISHI, M. C. *Ângulos de posição (CH) e características de usinagem*. 2012. Data de acesso: 04/07/2022. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/milling_corner.html>. Citado 2 vezes nas páginas v e 9.
- MITSUBISHI, M. C. *Efeitos das condições de corte para torneamento*. 2022. Data de acesso: 09/07/2022. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/turning_effects.html#:~:text=Em>. Citado na página 7.
- MOTTA, M. F. Estudo da influência de fluidos de corte na usinagem do abnt 8640. *Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia*, 1994. Citado na página 14.
- NASCIMENTO, W. R. do; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. de. Métodos de aplicação de fluido de corte no processo de retificação: uma revisão. *7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM*, p. 2, 2012. Citado na página 16.
- NEMANI, A. V.; GHAFARI, M.; NASIRI, A. On the post-printing heat treatment of a wire arc additively manufactured er70s part. *MDPI Materials*, p. 13, 2020. Citado na página 19.
- NOVELINO, A. L. B. Estudo da geometria dos cordões fabricados pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco. *Universidade de Brasília, UnB, Brasília*, p. 23–96, 2021. Citado 5 vezes nas páginas vi, viii, 17, 22 e 23.
- OLIVEIRA, C. C. F. de. Análise da microestrutura de peças impressas de arame er70s-6 obtidas através de manufatura aditiva por deposição a arco via processo cmt. *Universidade de Brasília, UnB, Brasília*, p. 33, 2022. Citado na página 19.

- OLIVEIRA, F.; RODRIGUES, A. Formação de rebarba e energia específica de corte no microfresamento. *Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM)*, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Oliveira-27/publication/328890726_FORMACAO_DE_REBARBA_E_ENERGIA_ESPECIFICA_DE_CORTE_NO_MICROFRESAMENTO/links/5be9dfa3299bf1124fce1932_FORMACAO-DE-REBARBA-E-ENERGIA-ESPECIFICA-DE-CORTE-NO-MICROFRESAMENTO.pdf>. Citado na página 46.
- RIBEIRO, A. de S. Aplicação de mínima quantidade de lubrificante no fresamento do aço sae 8640. *Universidade Federal de Brasília, UnB, Brasília*, p. 29–30, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- RIBEIRO, G. M. Verificação da influência do posicionamento do bocal do fluido de corte no fresamento de peças de er70s-6 obtidas por manufatura aditiva via cmt. *Universidade de Brasília, UnB, Brasília*, p. 1–88, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 26, 40 e 51.
- RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. de S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. *Revista Produção Online*, v. 16, p. 499–523, 2016. Citado na página 1.
- ROSA, F. G. da. Manufatura aditiva por deposição a arco: uma análise crítica da tecnologia e perspectivas para o futuro. *Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, UFRGS, Rio Grande Do Sul*, p. 14–21, 2020. Citado na página 17.
- ROSS, G. C. Estudo das forças de corte no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para a fabricação de tubos de aço com costura. *Escola Politécnica, Université de São Paulo, São Paulo*, p. 15–20, 2008. Citado na página 9.
- SANDVIK. *Fresamento sem refrigeração ou com fluido de corte*. 2022. Data de acesso: 16/07/2022. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/dry-milling-or-with-cutting-fluid.aspx>>. Citado na página 13.
- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. *Soldagem MIG/MAG*. São Paulo: Artliber, 2008. Citado na página 17.
- SEG. *Locação de rugosímetro mitutoyo modelo SJ-201*. 2022. Data de acesso: 08/09/2022. Disponível em: <<https://www.seginstrumentos.com.br/locacao/locacao-de-rugosimetro-mitutoyo-modelo-sj-201>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 32.
- STEMMER, C. E. *Ferramentas de Corte I*. Brasil: Editora UFSC, 1993. Citado 3 vezes nas páginas v, 4 e 5.
- TODHUNTER, L.; LEACH, R.; LAWES, S.; BLATEYRON, F. Industrial survey of iso surface texture parameters. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 19, p. 84–92, 2017. ISSN 1755-5817. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581717300251>>. Citado na página 30.
- TORRES, L. F. L. Seleção de parâmetros para fresamento de inconel 718 com ferramenta de metal duro revestida com tialn. *Universidade de Brasília, UnB, Brasília*, p. 28–35, 2022. Citado 4 vezes nas páginas 8, 15, 48 e 49.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. *Metal Cutting*. Inglaterra: Butterworth–Heinemann, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.

VIEIRA, J. de M. Influência de fluidos de corte no fresamento do aço nb 8640. *Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia*, 1997. Citado na página 14.

VOLPATO, N.; MUNHOZ, A. L. J.; COSTA, C. A.; AHRENS, C. H.; CARVALHO, J. de; SANTOS, J. R. L. dos; SILVA, J. V. L. da; FOGGIATTO, J. A.; LIMA, M. S. F. de. *Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher, 2017. Citado na página 18.

WORKFER. *Fresas em Metal duro*. 2022. Data de acesso: 05/09/2022. Disponível em: <<https://www.workfer.com/wp-content/uploads/2020/12/FRESAS-METALDURO.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas vii, viii, 24, 60 e 61.

WU, B.; PAN, Z.; DING, D.; CUIURI, D.; LI, H.; XU, J.; NORRISH, J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 35, p. 127–139, 2018. ISSN 1526-6125. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612518310739>>. Citado na página 18.

WURTH. *ER70S-6 arame MIG*. 2022. Data de acesso: 11/09/2022. Disponível em: <https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/bd-sp.canaldapeca.com.br/Wurth/13102020/PDFS_L7/0982705006.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 2.

ÁVILA, C. T. A. Estudo da usinagem de peças impressas por manufatura aditiva a arco, com foco no acabamento. *Universidade de Brasília, UnB, Brasília*, p. 1–97, 2022. Citado na página 51.

Anexos

A - Especificações da ferramenta de corte

G9A69	G9448	G9540	G9449	G9G51	G9453	G9F45 G9F46	G9A42	G9400
4	4	4	4	4	4	4&6	Multi Flute	2
30°	≈ 30°	≈ 30°	≈ 30°	≈ 30°	30°	45°	30°	30°
SQUARE	SQUARE	SQUARE	SQUARE	SQUARE	SQUARE	SQUARE	ROUGHING	DRILL MILL
D1.0	D2.0	D3.5	D2.0	D3.0	D3.0	D3.0	D6.0	D3.0
D20.0	D20.0	D20.0	D20.0	D20.0	D20.0	D20.0	D25.0	D20.0
588	589	590	591	592	593	594	595	596
SHORT LENGTH	SHORT LENGTH	LONG LENGTH	LONG LENGTH	LONG LENGTH with CHAMFER	EXTRA LONG LENGTH	SHORT LENGTH LONG LENGTH	LONG LENGTH	-
TiAlN based	TiAlN based	TiAlN based	TiAlN based	TiAlN based	TiAlN based	TiAlN based	X-Coating	TiAlN based

Figura 49 – Dados ferramenta de corte (WORKFER, 2022).



CARBIDE, 4 FLUTE SHORT LENGTH



G9A69 SERIES

G9A69010	1X3X3X39	6.88 €
G9A69015	1.5X3X5X39	6.88 €
G9A69020	2X3X7X39	6.88 €
G9A69025	2.5X3X7X39	6.88 €
G9A69030	3X3X10X39	6.88 €
G9A69040	4X4X14X51	7.66 €
G9A69050	5X5X16X51	8.05 €
G9A69060	6X6X19X64	11.58 €
G9A69080	8X8X21X64	14.40 €
G9A69100	10X10X22X70	21.75 €
G9A69120	12X12X25X76	32.13 €
G9A69160	16X16X32X89	54.07 €
G9A69200	20X20X38X102	88.95 €

◎ : Excellent ○ : Good

ISO	P											M				K				
	Non-alloy steel					Low alloy steel				High alloyed steel, and tool steel		Stainless steel		Grey cast iron	Nodular cast iron	Malleable cast iron				
Material Description	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
VDI 3323	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
HRc	13	25	28	32	30	10	29	32	38	15	35	15	23	10	10	26	3	25		21
HB	125	190	250	270	300	180	275	300	350	200	325	200	240	180	180	260	160	250	130	230
Recommend	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○

ISO	N										S						H				
	Aluminum-wrought alloy		Aluminum-cast, alloyed			Copper and Copper Alloys (Bronze / Brass)		Non Metallic Materials			Heat Resistant Super Alloys					Titanium Alloys		Hardened steel	Chilled Cast Iron	Hardened Cast Iron	
Material Description	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
VDI 3323	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
HRc											15	30	25	38	34			55	60	42	55
HB	60	100	75	90	130	110	90	100			200	280	250	350	320	400 Rm	1050 Rm	550	630	400	550
Recommend	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Figura 50 – Dados ferramenta de corte (WORKFER, 2022).

B - Especificações do material depositado



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, S235J0-S355J0, S235J2-S355J2, S275N-S420N, S275M-S420M, P235GH-P355GH, P275NL1-P355NL1, P215NL, P265NL, P355N, P285NH-P420NH, P195TR1-P265TR1, P195TR2-P265TR2, P195GH-P265GH, L245NB-L415NB, L245MB-L415MB, GE200-GE240, ship building steels: A, B, D, E, A 32-E 36 ASTM A 106 Gr. A, B, C; A 181 Gr. 60, 70; A 283 Gr. A, C; A 285 Gr. A, B, C; A 350 Gr. LF1; A 414 Gr. A, B, C, D, E, F, G; A 501 Gr. B; A 513 Gr. 1018; A 516 Gr. 55, 60, 65, 70; A 573 Gr. 58, 65, 70; A 588 Gr. A, B; A 633 Gr. C; A 662 Gr. B; A 711 Gr. 1013; A 841 Gr. A; API 5 L Gr. B, X42, X52, X56, X60				
Typical analysis				
	C	Si	Mn	
wt.-%	0.07	0.85	1.5	
Mechanical properties of all-weld metal - typical values (min. values)				
Condition	Yield strength R _e	Tensile strength R _m	Elongation A (L ₀ =5d ₀)	Impact energy ISO-V KV J
	MPa	MPa	%	-30°C
u	450 (≥ 420)	575 (≥ 500 - 640)	30 (≥ 20)	≥ 27
u2	430 (≥ 420)	555 (≥ 500 - 640)	29 (≥ 20)	≥ 27
u untreated, as welded – shielding gas Ar + 15 – 25% CO ₂				
u2 untreated, as welded – shielding gas 100% CO ₂				
Operating data				
	Polarity	DC+	Dimension mm	
	Shielding gas (EN ISO 14175)	M21	0.8	
		C1	0.9	
			1.0	
			1.2	
		1.6		
Approvals				
TÜV (13009), DB (42.236.01), ABS, CWB, CE				

Figura 51 – Dados sobre o material depositado para confecção da peça (BöHLER, 2022)

C - Especificações do centro de usinagem vertical

SPECIFICATION

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

STANDARD ACCESSORIES:

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

OPTIONAL ACCESSORIES

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

Machine Tools Traders (Madras)

Figura 52 – Centro de usinagem vertical - VEGA XH7132 (MADRAS, 2022)