



# PROJETO DE GRADUAÇÃO

Uso da metodologia indutiva e estudo de caso para avaliação e seleção de parâmetros para microfresamento de Inconel 718

Por,  
Henrique Hansen Barros

Brasília, 26 de Setembro de 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# Uso da metodologia indutiva e estudo de caso para avaliação e seleção de parâmetros para microfresamento de Inconel 718

POR,  
**Henrique Hansen Barros**

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

### **Banca Examinadora**

Profa. Déborah de Oliveira  
UnB/ ENM (Orientador)  
Prof. Lucival Malcher.  
UnB/ ENM (Coorientador)  
Prof. Maksym Ziberov  
UnB/ ENM  
Profa. Aline Gonçalves dos Santos  
UFCAT

Brasília, 26 de Setembro de 2022

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

BB277u      Barros, Henrique Hansen  
                    Usu da metodologia indutiva e estudo de caso para  
                    avaliação e seleção de parâmetros para microfresamento de  
                    Inconel 718 / Henrique Hansen Barros; orientador Déborah de  
                    Oliveira; co-orientador Lucival Malcher. -- Brasília, 2022.  
                    68 p.

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

                    1. Miniaturização. 2. Microfresamento. 3. Efeito Escala.  
                    4. Parâmetros de corte. 5. Inconel 718. I. de Oliveira,  
                    Déborah, orient. II. Malcher, Lucival, co-orient. III.  
                    Título.

Aos meus amados pais  
Ricardo e Patricia, à minha grandiosa família e aos meus queridíssimos amigos.

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me possibilitar vivenciar todas essas experiências grandiosas nesses anos de graduação que me transformaram completamente como pessoa.

Também gostaria de agradecer aos meus parentes e familiares por todo apoio e compreensão durante todos esses anos. Aos meus pais, em especial, Ricardo e Patrícia que me deram total e pleno suporte em todos os desafios a que me propus enfrentar. Igualmente a minha amada avó Regina por todo amparo nesse período.

Aos meus queridíssimos amigos, que dividiram comigo muitos momentos de nervosismo e superação, mas que também estiveram presentes em momentos de muita alegria e descontração, e seguramente fizeram esse desafio ser muito mais prazeroso.

À minha orientadora Déborah de Oliveira pelo apoio da ideia desde o primeiro momento, pela total disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e pela disposição de engrandecer esse projeto.

Ao meu coorientador Lucival Malcher por todo suporte e disposição para com o projeto, de forma a enriquecer mais ainda sua proposta.

À Draco Volans Aerodesgin por todos momentos de aprendizado e parceria que definitivamente marcaram a minha jornada dentro da universidade.

E finalmente, à Universidade de Brasília, à Faculdade de Tecnologia e ao Departamento de Engenharia Mecânica por todas as oportunidades de aprendizado.

## Resumo

Atendendo a crescente demanda de miniaturização de componentes tecnológicos, os processos de fabricação vêm sendo inovados cada vez mais para atender tal necessidade a níveis de qualidade elevados. A microusinagem em si participa desse âmbito de evolução, e apesar de seu processo ser semelhante ao tradicional, ele não é apenas a sua simples redução. O motivo para esta diferença é o chamado efeito escala, caracterizado pelo aumento exponencial da energia específica de corte e que ocorre, pois, as dimensões da ferramenta são da mesma magnitude da microestrutura do material usinado. Assim, é necessário atentar-se aos parâmetros de corte para que seja possível a formação de cavaco, entende-se que para tal condição, a espessura de corte deve ser maior que o raio de de ponta da ferramenta a fim de evitar a formação de fenômenos indesejados que resultem em uma usinagem de baixa qualidade. Dentre as ligas de interesse industrial, o Inconel 718 destaca-se devido às suas boas propriedades termomecânicas, no entanto é reconhecidamente uma liga de baixa usinabilidade. Tal fator se torna ainda mais crítico na microusinagem devido as altas taxas de desgaste da ferramenta e dificuldades na formação do cavaco, assim, poucas são as pesquisas e as discussões sobre o microfresamento desta liga existentes até o presente momento. Com isso, esse trabalho tem como objetivo o estudo teórico do microfresamento do Inconel 718 para obtenção de parâmetros de corte, seleção de microfresas e fluidos de corte, que possam favorecer e facilitar a aplicação do microfresamento da liga. Para isso utiliza-se a metodologia indutiva e de estudos de caso somadas a metodologia de revisão bibliográfica, resultando na compreensão de como os fatores citados influenciam no acabamento das peças de Inconel 718 microfresadas e também no desgaste da ferramenta diante a variação de condições e parâmetros de corte. Por fim, observa-se determinadas circunstâncias favoráveis para execução da atividade, como utilização de ferramentas com revestimento e fluido lubrificante de corte. Diante dos estudos levantados, sugere-se a adoção do valor de  $5 \mu\text{m}/\text{aresta}$  como avanço e 0,1 mm de profundidade de corte utilizando uma ferramentas revestidas de AlTiN. Por outro lado, não aconselha-se executar o microfresamento de Inconel 718 com comprimentos de usinagem elevados e também a utilização de ferramentas com elevado raio de aresta de corte combinadas a estreitos avanços e profundidades de corte.

**Palavras chave: Miniaturização, Microfresamento, Efeito Escala, Parâmetros de Corte, Inconel 718.**

## Abstract

Supporting a growing demand for miniaturization of technological components, manufacturing processes have been increasingly innovative to meet this need for quality levels for excellence. Micromachining itself participates in this scope of evolution, and despite its similar process to the traditional one, it is not just its simple reduction. The reason for this difference is the so-called scalar effect, characterized by the exponential increase in the specific cutting energy, which occurs because the dimensions of the tool are of the same magnitude as the microstructure of the machined material. Thus, it is necessary to be attentive to the cutting parameters so that chip formation is possible, it is understood that for such a condition, the cutting thickness must be that the tool tip reach in order to form unwanted phenomena that result in low quality machining. Among the alloys of industrial interest, Inconel 718 stands out due to its thermomechanical properties, however it is recognized as an alloy of low machinability. This factor becomes even more critical in micromachining due to high tool wear rates and difficulties in chip formation, thus, there are few researches and discussions about micromilling this alloy until now. Thus, this work aims to theoretically study of Inconel 718 micromilling to obtain cutting parameters, selection of micromills and cutting fluids, which may favor and facilitate the micromilling operation of the alloy. For this, the inductive methodology and case studies are used, combined with the methodology of bibliographic review, resulting in the understanding of how the mentioned factors influence the finish of the micromilled Inconel 718 parts and also the tool wear in presence of conditions variation and cutting parameters. Finally, there are certain favorable circumstances for carrying out the activity, such as the use of coated tools and cutting lubricating fluid. Faced with the raised studies, it is suggested to adopt the value of  $5 \mu\text{m}/\text{edge}$  as feed rate and 0.1 mm of cutting depth using an AlTiN coated tool. On the other hand, it is not advisable to carry out micro-milling of Inconel 718 with long machining lengths and also to use tools with a high cutting edge radius combined with narrow feed rates and depths of cut.

**Keywords:** Miniaturization, Micromilling, Size Effect, Cutting Parameters, Inconel 718.

## Sumário

<b>SUMÁRIO</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>viii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	3
1.3 Objetivos . . . . .	4
1.4 Notas do autor . . . . .	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1 Microusinagem . . . . .	5
2.2 Microfresamento . . . . .	7
2.2.1 Efeito Escala . . . . .	9
2.2.1.1 Influência da Microestrutura do Material de Trabalho . . . . .	9
2.2.1.2 Influência do Raio da Aresta . . . . .	10
2.2.1.3 Influência da Espessura de Corte . . . . .	11
2.2.1.4 Força e Energia Específica de Corte . . . . .	12
2.2.2 Fluido de Corte . . . . .	13
2.2.3 Parâmetros de Corte . . . . .	15
2.2.3.1 Rugosidade Superficial . . . . .	16
2.2.3.2 Formação de Rebarba . . . . .	18
2.3 Microfresamento de Inconel 718 . . . . .	22



---

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>25</b>
3.1	Metologia de pesquisa . . . . .	25
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>28</b>
4.1	Análise de estudos de microfresamento de Inconel 718 . . . . .	28
4.2	Avaliação das condições de usinagem e parâmetros de corte de estudos de microfresamento de Inconel 718 . . . . .	43
4.2.1	Análise de frequência das características e parâmetros de corte adotados .	43
4.2.2	Análise qualitativa dos experimentos diante os parâmetros de corte . . . .	51
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>58</b>
5.1	Recomendações de parâmetros . . . . .	59
5.2	Trabalhos futuros . . . . .	59
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>60</b>
<b>A</b>	<b>Anexo</b>	<b>64</b>
A.1	Tabela de fichamento das características de ferramenta, parâmetros de corte, lubrificação e resultados obtidos em estudos de microfresamento de Inconel 718. . .	64

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Microestruturas produzidas por corte através de uma microfresadora (MASUZAWA, 2000). . . . .	1
1.2	Precisão no processo de microusinagem mecânica (Adaptado de Chae, Park e Freiheit (2006)). . . . .	2
1.3	Análise microscópica do microfresamento em eletrodo de grafite (20 mm X 20 mm) utilizando uma ferramenta de 300 $\mu\text{m}$ de diâmetro. (CAMARA et al., 2012). . . . .	3
2.1	Escala do corte micrométrico (Adaptado de Rodrigues e Jasinovicus (2017)). . . . .	6
2.2	Micro-acelerômetro ampliado. Os dois "pentes" podem deslocar-se, um em relação ao outro, sob efeito de uma violenta aceleração. (Fonte: MEMS and Nanotechnology Clearinghouse). . . . .	7
2.3	(a) Dispositivo de sensor de pressão sanguínea, (b) Dispositivo de sensor de pressão sanguínea, e (c) Sensores de ponta de cateter intra-cardial para monitorar a pressão arterial durante cateterismo cardíaco. (Fonte: MEMS and Nanotechnology Clearinghouse). . . . .	7
2.4	Fresa convencional de 6000 $\mu\text{m}$ de diâmetro junto a uma microfresa de 200 $\mu\text{m}$ (BISSACCO, 2004 <i>apud</i> BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005). . . . .	8
2.5	Associação por meio do tamanho do grão e espessura do corte para (a) usinagem convencional e (b) microusinagem. (BISSACCO, 2004 <i>apud</i> BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005). . . . .	9
2.6	Efeito da aresta de corte na (a) usinagem convencional e (b) microusinagem. (BISSACCO, 2004 <i>apud</i> BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005). . . . .	10
2.7	Espessura de corte referente ao raio de aresta da ferramenta (Adaptado de Chae, Park e Freiheit (2006)). . . . .	11
2.8	Componentes da força de usinagem (Adaptado de Boothroyd e Knight (1989)). . . . .	12
2.9	Comparação da força de corte ( $F_c$ ) e força de avanço ( $F_f$ ) para microfresamento a seco e com uso de fluido lubrificante sob as condições de (a) e (b) 20000 rpm e (c) e (d) 60000 rpm. (Adaptado de (MITTAL; KULKARNI; SINGH, 2017)). . . . .	14

2.10	Formação de rebarba sob diferentes condições de resfriamento e lubrificação (Adaptado de (ASLANTAS; ÇIÇEK, 2018)). . . . .	15
2.11	Comparação da qualidade da superfície referente a rugosidade média ( $R_a$ ) entre diferentes processos (Adaptado de Byrne, Dornfeld e Denkena (2003)). . . . .	17
2.12	Rugosidade superficial em microfresamento a seco e MQL com (a) variação do avanço e rotação constante (30000 rpm) e (b) avanço constante (1 $\mu\text{m}$ /dente e variação da rotação. (Adaptado de (LI; CHOU, 2010)). . . . .	18
2.13	Rebarba formada diante de diferentes avanços e velocidades de corte (Adaptado de Filiz et al. (2007)). . . . .	19
2.14	Tamanho da rebarba proveniente do aumento da rotação da ferramenta (a) e aumento do avanço (b). (Adaptado de Kumar, Kumar e Singh (2017)). . . . .	20
2.15	Forma e localização de rebarba geradas do microfresamento da Liga Ti-6Al-4V a seco (ZIBEROV, 2018). . . . .	21
2.16	Formação de (a) rebarba tipo pena e (b) rebarba primária no microfresamento de aço inoxidável duplex UNS S32205. (Dos Santos (2016)). . . . .	22
2.17	Materiais estudados em microusinagem. (Adaptado de Camara et al. (2012)). . . . .	23
3.1	Modelo de Revisão Sistemática da Literatura (Adaptado de Garza-Reys (2015)). . . . .	27
4.1	Simulação de formação de cavaco a um avanço de (a) 0,5 $\mu\text{m}$ , (b) 1,0 $\mu\text{m}$ , (c) 1,5 $\mu\text{m}$ , (d) 2,0 $\mu\text{m}$ , (e) 3,0 $\mu\text{m}$ e (f) 4,0 $\mu\text{m}$ (Adaptado de Wang et al. (2017)). . . . .	29
4.2	Valores de desgaste em função do diâmetro da ferramenta relacionados aos parâmetros de corte a seco (De Oliveira (2019)). . . . .	30
4.3	Transição de zona com fluido de corte insuficiente para zona com fluido de corte suficiente (De Oliveira (2019)). . . . .	30
4.4	Influência do avanço na rugosidade superficial (Kiswanto, Azmi e Ko (2019)). . . . .	31
4.5	Influência da velocidade de corte na rugosidade superficial (Kiswanto, Azmi e Ko (2019)). . . . .	32
4.6	Variação de diâmetro de ferramenta de acordo com avanço (Ucun, Aslantas e Bedir (2015)). . . . .	33
4.7	Rugosidade superficial de acordo com avanço (Ucun, Aslantas e Bedir (2015)). . . . .	33
4.8	Variação do raio de aresta com taxa de avanço para ferramenta sem revestimento após processo de corte de 120 mm (Ferramenta sem revestimento) (Ucun, Aslantas e Bedir (2015)). . . . .	34
4.9	Variação do diâmetro de ferramenta de acordo com o comprimento de usinagem sob diferentes condições de corte (Aslantas e Çiçek (2018)). . . . .	35

4.10	Estado das ferramentas pós microusinagem sob diferentes condições de corte (Aslantas e Çiçek (2018)). . . . .	35
4.11	Variação do diâmetro de ferramenta de acordo com o comprimento de usinagem sob diferentes condições de corte (Aslantas e Çiçek (2018)). . . . .	36
4.12	Variação da largura de rebarba em relação ao comprimento de usinagem sob condições de corte distintas no sentido concordante. (Aslantas e Çiçek (2018)). . . . .	36
4.13	Variação da largura de rebarba em relação ao comprimento de usinagem sob condições de corte distintas no sentido discordante. (Aslantas e Çiçek (2018)). . . . .	37
4.14	Diferença entre a altura da rebarba na usinagem do INCONEL 718 a seco e nas condições de aplicação de fluido submersa utilizando-se Vasco 1000 e óleo sintético (dos Santos et al. (2021)). . . . .	38
4.15	Superfície de Inconel 718 fabricado pro manufatura aditiva após a soldagem (Sadiq et al. (2018)). . . . .	38
4.16	Variação da rugosidade superficial em relação ao comprimento de usinagem ao utilizar o método MQL a uma velocidade de corte de 14 m/min (Sadiq et al. (2018)). . . . .	39
4.17	Variação da rugosidade superficial em relação ao comprimento de usinagem ao utilizar o método MQL a uma velocidade de corte de 19 m/min (Sadiq et al. (2018)). . . . .	40
4.18	Desgaste de ferramenta resultante do microfresamento de Inconel 718: (a) Experimento 2 - Velocidade de rotação de 10000 r/min, velocidade de avanço de 75 mm/min e profundidade de corte de 75 $\mu\text{m}$ e (b) Experimento 8 - Velocidade de rotação de 12000 r/min, velocidade de avanço de 75 mm/min e profundidade de corte de 50 $\mu\text{m}$ (Kuram e Ozelik (2015)). . . . .	41
4.19	Textura superficial resultante do microfresamento de Inconel 718: (a) Experimento 2 - Velocidade de rotação de 10000 r/min, velocidade de avanço de 75 mm/min e profundidade de corte de 75 $\mu\text{m}$ e (b) Experimento 8 - Velocidade de rotação de 12000 r/min, velocidade de avanço de 75 mm/min e profundidade de corte de 50 $\mu\text{m}$ (Kuram e Ozelik (2015)). . . . .	42
4.20	Frequência do diâmetro das ferramentas utilizadas nos estudos. . . . .	44
4.21	Frequência dos raios de aresta de corte . . . . .	45
4.22	Frequência de revestimentos vigentes nas microfresas utilizadas. . . . .	46
4.23	Recorrência de cada Velocidade de corte determinada pelos autores do estudos analisados. . . . .	47
4.24	Recorrência dos avanços definidos nos ensaios considerados. . . . .	48
4.25	Recorrência dos valores definidos como profundidade de corte diante dos estudos analisados. . . . .	49

---

4.26	Frequência do comprimento de usinagem dos ensaios considerados. . . . .	50
4.27	Recorrência dos lubrificantes e respectivo métodos de aplicação utilizado na amostragem analisada. . . . .	51
4.28	Redução do diâmetro de ferramenta diante seus respectivos parâmetros de corte com uso de lubrificantes. . . . .	52
4.29	Formação de rebarba no sentido concordante de usinagem diante seus respectivos parâmetros de corte. . . . .	53
4.30	Formação de rebarba no sentido discordante de usinagem diante seus respectivos parâmetros de corte. . . . .	55
4.31	Rugosidade superficial produzida diante microfresamento sob método de lubrificação MQL. . . . .	56
4.32	Rugosidade superficial diante microfresamento a seco. . . . .	57
A.1	Tabela de detalhamento das condições de ferramenta, parâmetros de corte, lubrificantes e resultados obtidos nos estudos levados em consideração. . . . .	68

## LISTA DE TABELAS

2.1	Composição química do Inconel 718 de acordo com Reed (2006). . . . .	24
3.1	Termos utilizados para levantamento bibliográfico. . . . .	26
4.1	Controle de parâmetros e seus níveis (Kuram e Ozcelik (2015)). . . . .	40
4.2	Matriz ortogonal $L_9$ ( $3^3$ ) de Taguchi (Kuram e Ozcelik (2015)). . . . .	41
4.3	Desgaste de ferramenta e rugosidade superficial resultantes do microfresamento de Inconel 718 (Kuram e Ozcelik (2015)). . . . .	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$^{\circ}\text{C}$  Graus Celsius

### Siglas

$a_p$  Profundidade de corte

$F_c$  Projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte

$F_f$  Projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço

$F_p$  Projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho

$f_z$  Avanço por dente

$R_a$  Rugosidade Média

$v_f$  Velocidade de avanço

ASM *American Society of Metals* (Sociedade Americana de Metais)

DCL *Diamond Like Carbon*

MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems (Sistemas Microeletromecânicos)

MQL Mínima quantidade de lubrificante

NI Não Informado

SLM *Selective Laser Melting*

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

Nos últimos anos, foi possível notar um expressivo avanço na tecnologia disponível para a microfabricação. A necessidade de produtos e componentes cada vez mais compactos com devida precisão dimensional e geométrica vem impulsionando pesquisas e estudos na área. Os campos da indústria bioquímica, biotecnologia, aeroespacial e eletrônica destacam-se diante de tal situação. Ademais, a microfabricação também vem auxiliando na incrementação de características estruturais pequenas e complexas em peças grandes, aprimorando a funcionalidade das mesmas (CÂMARA, 2014).

Até meados de 1960, tem-se poucos registros de componentes miniaturizados fabricados em escala industrial. O relógio de pulso, por exemplo, fazia parte desse seleto grupo de elementos com esse nível de grandeza. Entretanto, seguindo a tendência e demanda mundial, de produtos e objetos miniaturizados, tal grupo foi expressivamente ampliado. E graças ao aprimoramento dos processos de microfabricação, diferentes peças e geometrias passaram a poder ser realizadas, como pode-se observar na Figura 1.1 (MASUZAWA, 2000).



Figura 1.1: Microestruturas produzidas por corte através de uma microfresadora (MASUZAWA, 2000).

A fabricação de microcomponentes é uma atividade que exige uma precisão altíssima. De forma que, tais mecanismos de produção devem atender a tolerâncias extremamente estreitas.



Nesse contexto, a microusinagem tem sido apresentada como uma importante ferramenta. Tal processo é classificado como de alta ou ultra precisão, como observa-se na Figura 1.2, devido ao abrangimento da produção de componentes em escala micrométrica (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

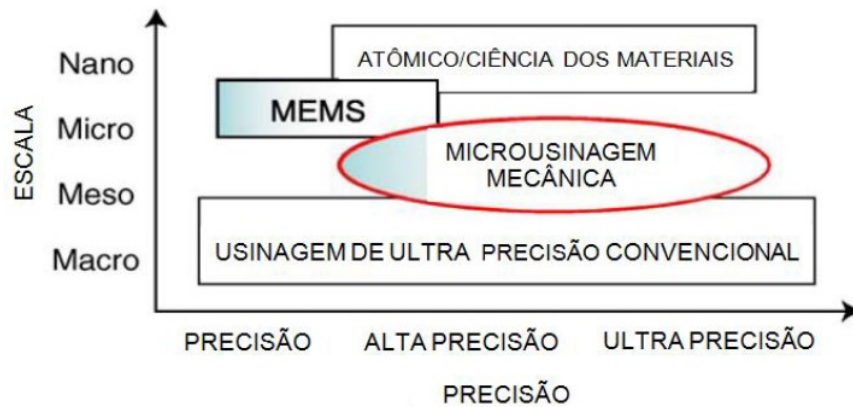


Figura 1.2: Precisão no processo de microusinagem mecânica (Adaptado de Chae, Park e Freiheit (2006)).

Ferraresi (1977) descreve o processo de usinagem como aquela que confere à peça o formato, ou dimensionamento, ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer dos três fatores, gerando a produção de cavaco. Ainda de acordo com o autor, cavaco é dito como a porção de material da peça retirada pela ferramenta. Dessa forma, entende-se que o processo de microusinagem segue as mesmas características, porém em escala micro. No entanto, vale ressaltar que muitos autores apontam que a microusinagem não é apenas a redução do processo macro (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006; CHENG; HUO, 2013).

Camara et al. (2012) caracterizam o processo de microusinagem referindo-se ao tamanho da ferramenta utilizada. Com isso, para uma atividade ser englobada em tal processo, a ferramenta deve possuir dimensões entre  $1\ \mu\text{m}$  e  $1000\ \mu\text{m}$ . Na Figura 1.3 é possível perceber o nível do detalhamento do microfresamento ao utilizar uma ferramenta de  $300\ \mu\text{m}$  de diâmetro. Os autores também complementam que o principal aspecto da microusinagem é o fato do raio de aresta de corte da ferramenta ter as dimensões próximas às da microestrutura do material e da espessura de corte. Dessa forma, conforme mencionado, as teorias desenvolvidas para a usinagem tradicional tornam-se inválidas para o processo em escala micro.

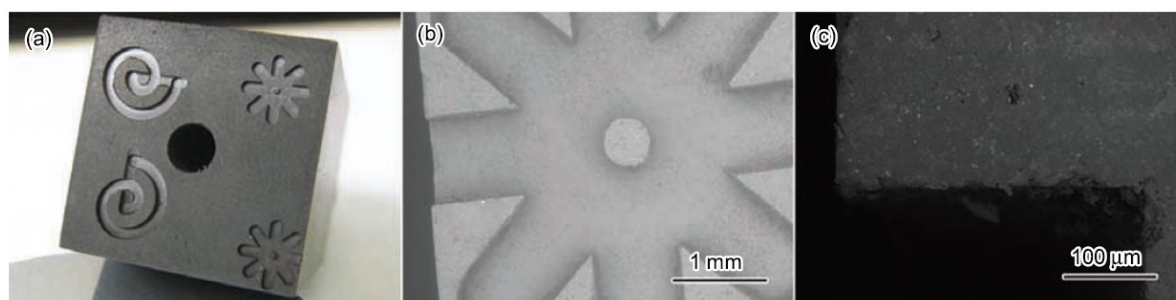


Figura 1.3: Análise microscópica do microfresamento em eletrodo de grafite (20 mm X 20 mm) utilizando uma ferramenta de 300  $\mu\text{m}$  de diâmetro. (CAMARA et al., 2012).

No processo de microusinagem, tem-se como o principal desafio a interação da ferramenta com a peça. Encontra-se dificuldade em tal relação devido a dependência da espessura mínima de corte. De forma que, é possível a não geração de cavaco quando não se atinge essa espessura devido à geração de efeitos elásticos no material, enquanto que para a geração de cavaco deseja-se efeitos plásticos (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Dentre os diferentes materiais de engenharia que podem ser microfresados, destaca-se o Inconel 718 que é um material conhecido por suas excelentes propriedades físicas relacionadas a alta resistência mecânica, resistência à fadiga e à fluência. Outra característica relevante nesse material é sua resistência a corrosão e sua aplicabilidade contínua em ambientes de temperaturas elevadas. Entretanto, esse material também apresenta características desfavoráveis, como por exemplo, uma difícil usinabilidade (ASM, 1990).

## 1.2 Motivação

Dentro do cenário atual, sabe-se que ainda existe uma grande demanda de estudos relacionados a microusinagem e principalmente ao microfresamento quando comparados aos mesmos processos em escala tradicional. Ademais, os estudos de ligas metálicas ainda se restringem consideravelmente aos elementos tradicionais ou de alta usinabilidade, como aço, alumínio e cobre.

De Oliveira (2019) relata que apenas 4% do plano de pesquisa de usinagem está voltado para o microfresamento. A autora acrescenta também que o Inconel 718 junto a algumas outras ligas metálicas somam cerca de 6% do universo de estudo das ligas metálicas estudadas em microfresamento. Com isso, conclui-se que o microfresamento de inconel abrange cerca de 0,24% de todo o ramo de pesquisa de usinagem.

Diante disso e da realidade moderna que demanda cada vez mais componentes tecnológicos em escalas altamente reduzidas, o estudo do microfresamento de Inconel 718 aparece como sendo uma ótima proposta para contribuir com o conhecimento específico da área.

## 1.3 Objetivos

Neste trabalho, tem-se como objetivo o levantamento e análise de trabalhos representativos para o microfresamento de Inconel 718. Tal investigação terá o propósito de acumular dados relevantes para as aplicações futuras levando em conta experiências prévias de outros autores com o microfresamento desse material. Assim, foram feitas recomendações de parâmetros de corte para a então execução da atividade.

De maneira mais específica, o presente trabalho segue o propósito listado.

- Levantamento de uma base bibliográfica relevante com estudos de caso;
- Compilação da base de dados levantada com intuito comparativo.
- Análise da base bibliográfica avaliando as condições apresentadas e os resultados obtidos em cada estudo;
- Apresentar recomendações diante de todo o conteúdo analisado;

## 1.4 Notas do autor

No decorrer do desenvolvimento deste projeto de graduação, elaborou-se o artigo (BARROS; MALCHER; DE OLIVEIRA, 2022) com a mesma temática no qual sua publicação ocorreu no Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM de 2022.

- BARROS, HENRIQUE; MALCHER, LUCIVAL; DE OLIVEIRA, DÉBORAH. Seleção de parâmetros para microfresamento de Inconel 718 através da metodologia indutiva e estudo de caso. In: XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2022, 2022, Teresina.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Microusinagem

O processo de usinagem é considerado popular ao redor do mundo. Tal operação, de acordo com Ferraresi (1977), é entendida como aquela que confere à peça o formato, ou dimensionamento, ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer dos três fatores, gerando a produção de cavaco. Ainda de acordo com o autor, cavaco é dito como a porção de material da peça retirada pela ferramenta, e é caracterizado por apresentar geometria irregular.

Uma das formas de usinagem é a chamada microusinagem. Este tipo de processo, tem diversas aplicações, Rajurkar et al. (2006) citam que entre as vantagens oferecidas pela microusinagem, destaca-se a possibilidade de atingir maiores detalhes na peça fabricada. Além de poder ser usada para fazer protótipos, ser aplicável na produção em massa, ter alta qualidade de superfície e custo relativamente baixo.

Em uma primeira abordagem, entende-se que o processo de microusinagem ocorre similarmente ao de usinagem, mas em escala micro. Entretanto, diferentes autores afirmam que não pode-se considerar a microusinagem uma simples redução da usinagem macro, pois ainda há uma grande necessidade de aprimoramento dos processos e de sua compreensão, devido às suas peculiaridades.

Camara et al. (2012) caracterizam microusinagem como procedimento de corte onde as ferramentas devem possuir dimensões entre os valores de 1  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$ . Esse mesmo procedimento é possível de ser definido em função da espessura do corte. Do mesmo modo, delimita-se que a espessura de corte é uma especificação significativa, e talvez a principal, que caracteriza o processo (DE OLIVEIRA, 2019).

Entretanto, as definições de caracterização de um processo de microusinagem ainda não estão em consenso. Rodrigues e Jasinovicus (2017) acreditam que seja necessário uma especificação mais detalhada para definir tal metodologia. Os autores também questionam as faixas micrométricas definidas e as dimensões da ferramenta ou características funcionais do produto que podem ser consideradas micrométricas estando abaixo da faixa de 1 mm. Dessa forma, foi determinado pelos autores, de acordo com a Figura 2.1, os principais parâmetros de corte da

microusinagem, como espessura, profundidade, raio de aresta da ferramenta e tamanho de grão. Assim, estabeleceu-se uma caracterização mais completa desse processo, que passou a levar em consideração tanto as dimensões físicas da ferramenta quanto as configurações de corte.

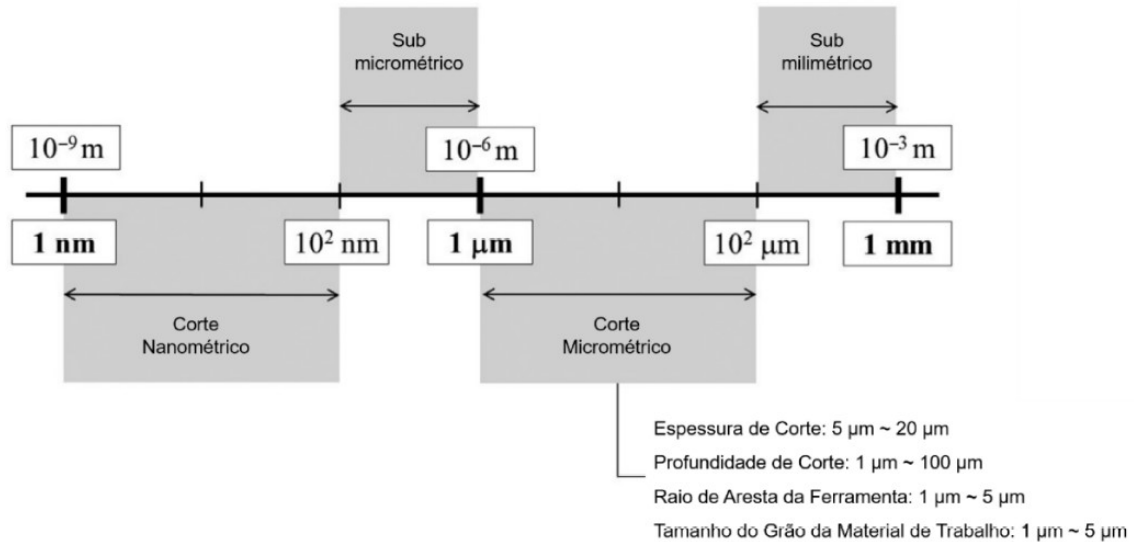


Figura 2.1: Escala do corte micrométrico (Adaptado de Rodrigues e Jasinevicius (2017)).

Sobre a ferramenta de corte, Chae, Park e Freiheit (2006) comparam o instrumento de corte para ambos os processos (macro e microusinagem). Ao passo que a usinagem convencional sugere-se uma aresta de corte perfeitamente afiada, na microusinagem o raio de aresta deve ser maior que a espessura de corte.

O processo de usinagem em escala micro é um dos mais certos direcionamentos da engenharia moderna. A tendência de miniaturização de produtos comerciais e de engenharia é inevitável. Ziberov et al. (2020) relatam que tal processo é o mais versátil para moldar microcomponentes subtrativamente e que sua aplicação na área médica, ciências biológicas e também nas indústrias bioquímica, aeroespacial e eletrônica geram resultados altamente positivos.

No âmbito da eletrônica, tem-se o exemplo da compactação de circuitos elétricos após a introdução de dispositivos semicondutores. De forma que pacotes de circuito integrado necessitavam acomodar dispositivos com microdimensões e relés e interruptores demandavam a montagem de microcomponentes para a sua fabricação (MASUZAWA, 2000). Na Figura 2.3 é possível observar um exemplo de microcomponente eletrônico.

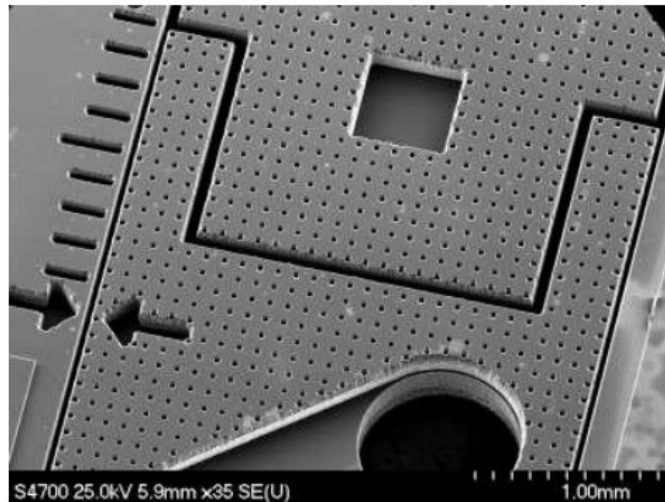


Figura 2.2: Micro-accelerômetro ampliado. Os dois "pentes" podem deslocar-se, um em relação ao outro, sob efeito de uma violenta aceleração. (Fonte: MEMS and Nanotechnology Clearinghouse).

Uma outra grande área cuja demanda por microcomponentes é crescente é a área médica, que vem exigindo ferramentas e componentes com proporções cada vez menores objetivando a melhoria na qualidade de vida e redução da dor do paciente. Conseqüentemente, a miniaturização de instrumentos médicos torna-se extremamente eficiente para alcançar essa propósito (MASUZAWA, 2000). A Figura 2.3 mostra alguns exemplos de microcomponentes médicos.



Figura 2.3: (a) Dispositivo de sensor de pressão sanguínea, (b) Dispositivo de sensor de pressão sanguínea, e (c) Sensores de ponta de cateter intra-cardial para monitorar a pressão arterial durante cateterismo cardíaco. (Fonte: MEMS and Nanotechnology Clearinghouse).

## 2.2 Microfresamento

Inicialmente, antes de introduzir os conceitos de microfresamento é pertinente uma breve introdução ao tópico de fresamento em escala convencional. O fresamento fundamenta-se na remoção de material de uma peça de modo intermitente, devido a ação do movimento rotativo e de translação com ação multi-cortante de uma ferramenta. O que resulta em uma gama de possibilidades de geometrias (STEMMER, 2005).

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) definem que o processo de fresamento, que consiste de uma operação de usinagem, deve ter uma ferramenta, chamada fresa, provida de arestas de corte dispostas de forma simétrica em torno de um eixo. Além disso, os autores também mencionam que para a caracterização de tal processo o movimento de corte deve ser proporcionado pelo movimento de rotação da fresa ao redor do seu eixo, de forma que com a movimentação da peça ou da ferramenta, o processo de remoção de material irá acontecer.

Sobre o segmento em escala reduzida do processo, entende-se que fresamento em escala micro proporciona a fabricação de itens em três dimensões compostos por diferentes materiais, como ligas metálicas e materiais cerâmicos e poliméricos (CAMARA et al., 2012). A Figura 2.4 representa claramente as diferenças geométricas entre uma fresa convencional e uma microfresa.

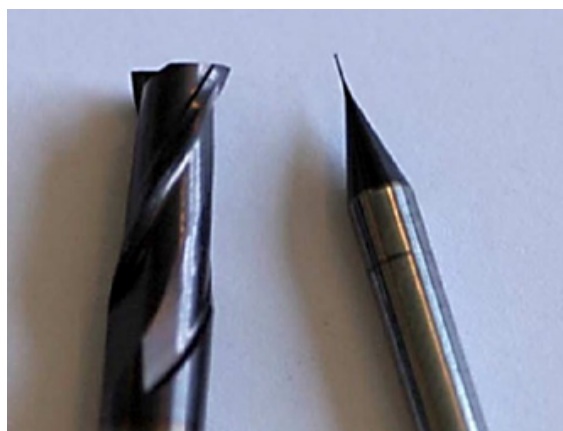


Figura 2.4: Fresa convencional de  $6000\ \mu\text{m}$  de diâmetro junto a uma microfresa de  $200\ \mu\text{m}$  (BISSACCO, 2004 *apud* BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005).

Também segundo Camara et al. (2012), uma grande quantidade de processos de micro-fresamento são executados com fresas de topo de duas arestas de corte, contendo ponta chata ou arredondada. Tais fresas, para trabalhar com ligas de aço, normalmente são constituídas de carboneto de tungstênio (metal duro) refinado. Entretanto, outras configurações de geometria e materiais de fresa possam ser usados. Camara et al. (2012) mencionam ainda que no micro-fresamento é necessário que se leve em consideração a espessura de corte e o tamanho do grão do material a ser usinado, uma vez que essas são grandezas essenciais para a determinação do raio de ponta da ferramenta, que terá escala similar a elas, diferente do que ocorre na usinagem macro .

O processo de microfresamento, que está incluso dentro do campo de microusinagem, enfrenta muitos desafios que precisam ser superados para sua aplicação. Um desses obstáculos é a formação de rebarbas, que podem ser removidas com o auxílio de diversos procedimentos diferentes de rebarbação. Contudo, a implementação de tais procedimentos resultará no encarecimento da peça. De acordo com Gillespie (2003), os gastos relacionados a meios tecnológicos de uso menos tradicional para o tratamento da rebarbação torna tais métodos de usinagem menos vantajosos economicamente, devido ao fato de não agregar valor ao produto final. Ademais, nem sempre o critério de rebarbação adquire a característica desejada para os microcomponentes da mesma forma que ocorrem na escala macro, fator que prejudica ainda mais a extração em tal

escala.

### 2.2.1 Efeito Escala

Como já foi dito anteriormente, tanto para o processo de usinagem quanto para o de fresamento em escala micro, não é possível transformar o processo macro no de micro simplesmente realizando uma redução de escala. O procedimento de microusinagem/microfresamento possui fenômenos individuais que podem ser definidos pelo efeito escala.

Liu e Melkote (2007) afirmam que tal efeito é possível de ser caracterizado como o acréscimo não linear da energia específica de corte, ou em outras palavras, pelo aumento da energia por unidade de volume de material removido resultante da redução da espessura de corte.

#### 2.2.1.1 Influência da Microestrutura do Material de Trabalho

Levando em consideração que ao reduzir o tamanho da ferramenta e do material retirado, também reduz-se o avanço por dente. Apesar desse acontecimento, tal fenômeno não ocorre com o tamanho do grão do material que está sendo usinado. Com isso, entende-se que a remoção de grãos no processo de microfresamento abrange uma quantidade menor quando comparado ao processo convencional. Acredita-se, que no processo micro, as remoções de grãos ocorram de forma unitária ou próxima disso (BISSACCO; HANSEN; CHIFFRE, 2005). Na Figura 2.5 é possível observar esta diferença.

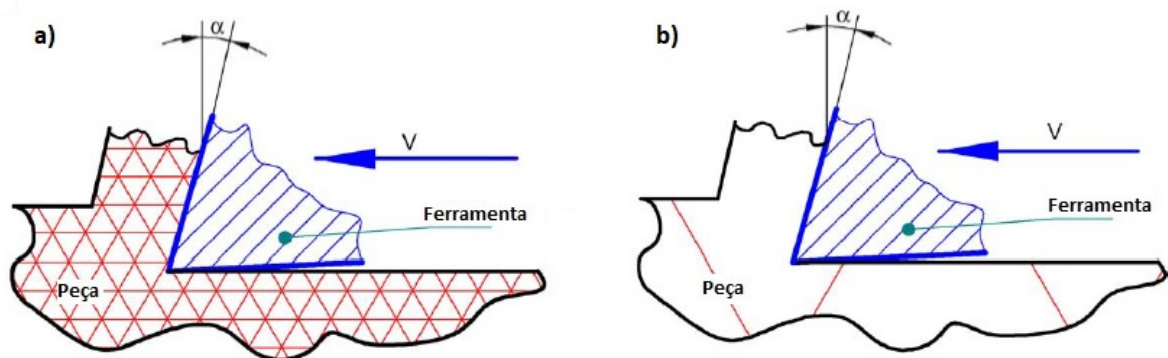


Figura 2.5: Associação por meio do tamanho do grão e espessura do corte para (a) usinagem convencional e (b) microusinagem. (BISSACCO, 2004 *apud* BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005).

Com isso, fica nítido a diferença do processo de usinagem em ambas situações. De forma que no procedimento convencional as propriedades do material usinado são consideradas homogêneas e isotrópicas. E já no microfresamento, devido às propriedades singulares de cada grão, considera-se as propriedades do material como heterogêneas e anisotrópicas (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006; CHENG; HUO, 2013).

Complementarmente, Furukawa e Moronuki (1988) realizaram estudos objetivando com-



preender a relevância da microestrutura dos materiais e processos de corte de ultraprecisão. Os autores observaram que para materiais não homogêneos encontram-se grandes variações dinâmicas no processo e também em suas respectivas forças em função de cada grão ter uma propriedade e orientação particular. E assim, os autores sugerem a adoção de parâmetros de corte que possibilitem o material de apresentar um comportamento próximo ao encontrado nas condições convencionais, ou seja, materiais amorfos com granulometria fina e/ou profundidades de corte dez vezes menores que os tamanhos médios de grão do material.

### 2.2.1.2 Influência do Raio da Aresta

No processo de microfresamento, o raio de aresta da ferramenta de corte dispõe de maior responsabilidade no corte quando comparado ao processo convencional. A Figura 2.6 representa claramente tal situação, onde a figura a) e b) representam o corte macro e o micro respectivamente. De forma que, no regime macro a aresta de corte é considerada completamente afiada, enquanto no micro tais arestas possuem raio de  $1\mu\text{m}$  a  $4\mu\text{m}$ , sendo grandes em comparação às outras variáveis do processo (BISSACCO; HANSEN; CHIFFRE, 2005).

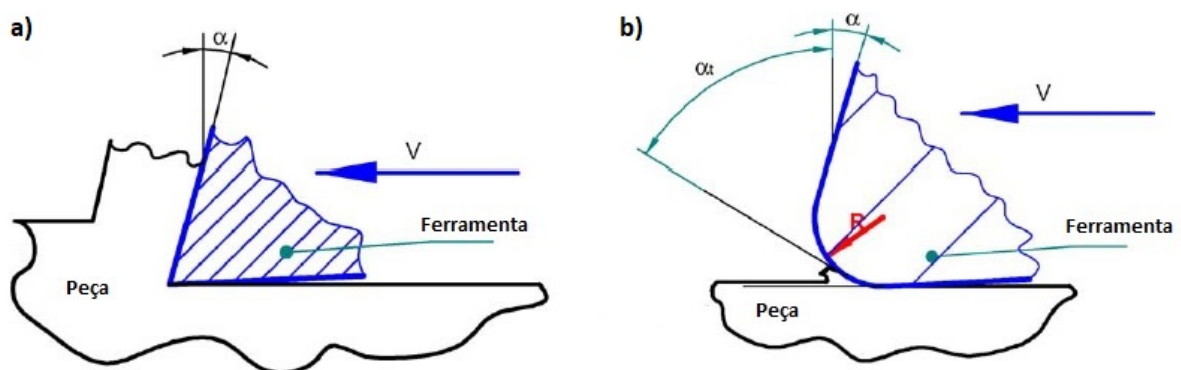


Figura 2.6: Efeito da aresta de corte na (a) usinagem convencional e (b) microusinagem. (BISSACCO, 2004 *apud* BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005).

Ainda de acordo com Bissacco, Hansen e Chiffre (2005), diante de tal situação, no processo de microfresamento, a espessura de corte geralmente apresenta um dimensionamento inferior ao raio da aresta de corte, o que resulta na formação de um cavaco com um ângulo de saída efetivo altamente negativo.

Com um ângulo de saída negativo, entende-se que a remoção do material está ocorrendo na região do raio da aresta de corte da ferramenta. O que resulta na compressão de parte considerável do material e o efeito *ploughing*, ou sulcamento. Tal efeito é responsável pela deformação elástica e/ou plástica do material. E conseqüentemente, ocorre o aumento das forças de cisalhamento e a recuperação elástica que elevam a energia específica de corte, além de influenciar negativamente a integridade das superfícies geradas (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006; CHENG; HUO, 2013).

### 2.2.1.3 Influência da Espessura de Corte

Reafirmando o que foi explicado na seção anterior, Cheng e Huo (2013) argumentam que a espessura do corte equivale a dimensão do material a ser usinado no processo. Consequentemente, possuem crucial relevância na formação de cavacos em escala micro.

Entretanto, tal processo não depende única e exclusivamente do raio de aresta da ferramenta, outro valor importante é a espessura mínima de corte.

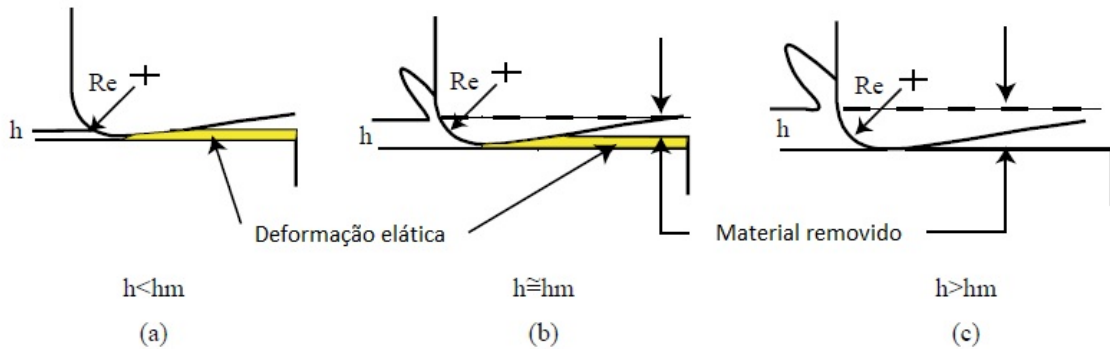


Figura 2.7: Espessura de corte referente ao raio de aresta da ferramenta (Adaptado de Chae, Park e Freiheit (2006)).

Na Figura 2.7 é possível observar em (a) um exemplo de quando a espessura de corte não é suficiente para a formação de cavaco devido a geração exclusiva de deformação elástica *rubbing*. Já em (b) é apresentado o caso em que a espessura é aproximadamente igual e já há a formação de cavaco e conseqüentemente ocorre a remoção de material da peça, mas também boa parte do material que entra em contato com a ferramenta sofre deformação elástica e permanece na peça *ploughing*. E por fim em (c), pode-se observar que a espessura é suficiente para que não haja deformação elástica e praticamente todo o material que entra em contato com a ferramenta é retirado do corpo (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Muitos pesquisadores vem realizando estudos com o objetivo de determinar uma espessura mínima de corte, uma vez que tal característica influencia na formação de cavaco e no acabamento superficial. Son, Lim e Ahn (2005) estudaram a influência do coeficiente de atrito sobre a espessura mínima de corte em processos de microusinagem. Os resultados obtidos pelos autores determinaram a espessura mínima do cavaco baseado na raio de aresta da ferramenta e no coeficiente de atrito entre a peça e a ferramenta. A Equação 2.1 apresenta tal relação.

$$h_m = r_e(1 - \cos(\theta_m)) \quad (2.1)$$

Onde  $h_m$  representa a espessura mínima de corte,  $r_e$  o raio de aresta da ferramenta e  $\theta_m$  pode ser obtido de duas formas: ângulo de atrito entre o material não removido da peça e a ferramenta ou o ângulo entre o cavaco contínuo e a ferramenta.

### 2.2.1.4 Força e Energia Específica de Corte

Durante a execução do corte, também torna-se necessário a análise das condições envolvidas para a realização de tal trabalho. Machado et al. (2011) afirmam que o estudo da técnica é justificado pela viabilidade da estimativa das forças atuantes na parte ferramental e maquinaria, além da potência requerida para a realização da atividade. Os autores continuam a análise determinando a existência de três tipos de força de usinagem (MACHADO et al., 2011).

- Força de corte ( $F_c$ ): Projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte;
- Força de avanço ( $F_f$ ): Projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço;
- Força passiva ( $F_p$ ): Projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

A Figura 2.8 demonstra as forças citadas pelos autores.

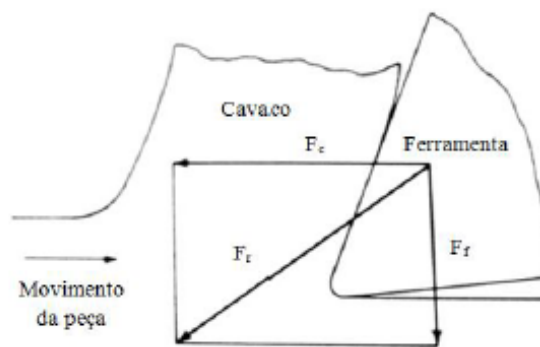


Figura 2.8: Componentes da força de usinagem (Adaptado de Boothroyd e Knight (1989)).

Chae, Park e Freiheit (2006) acrescentam que no processo de microusinagem, as forças de corte atuam de maneira diferente diante da redução da espessura de corte quando comparadas ao processo convencional. Tal fenômeno ocorre devido a influência direta da formação de cavaco.

Relacionado as forças de corte, Bissacco, Hansen e Chiffre (2005) relatam certa incerteza na relação de espessura de corte com as forças do mesmo processo. De forma que, com o aumento da seção transversal do cavaco ocorre o aumento de tais forças, as mesmas forças sofrem certa redução devido ao ângulo de saída ser mais positivo, diminuindo o efeito *ploughing*.

Conforme comentado na Subseção 2.2.1, a redução desproporcional entre a força e a espessura de corte resulta no aumento da energia específica da atividade de microusinagem. Esse esforço é deliberado como a energia consumida na remoção de um volume unitário do material, a qual é determinada razão da potência de corte com a taxa de extração (CHENG; HUO, 2013).

Durante a microusinagem, em virtude do comparável tamanho entre espessura e raio da aresta de corte, tem-se que o cavaco formado é provido de uma aresta de corte arredondada.

Consequentemente, acrescentando o que já foi dito anteriormente, um grande volume do material é deformado plasticamente, mas não seu volume total. Esse fenômeno ocorre quando a espessura de corte é inferior a mínima, o que resulta reprodução do *rubbing* e *ploughing*. À vista disso, tem-se como resultado um aumento não linear da energia específica de corte (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Perante as forças relacionadas ao processo de microusinagem, estudos são necessários para a análise do desgaste da ferramenta, uma vez que deseja-se encontrar estabilidade em tal atividade (CHENG; HUO, 2013). Nestes estudos, como no de De Oliveira (2019) são desenvolvidos modelos numéricos, analíticos e simulações por elementos finitos para se obter tais forças desejadas.

### 2.2.2 Fluido de Corte

No processo de usinagem, o fluido de corte tem como principais funções a remoção de calor e a lubrificação. Tal fator é responsável pela redução das forças de corte do processo, o que resulta em um melhor acabamento superficial, redução do desgaste da ferramenta, favorece a remoção de cavacos da área usinada e proteger as partes envolvidas da corrosão (RUNGE; DUARTE, 1990). Mais especificamente, o fluido de corte em baixas velocidades de corte possui função de lubrificação, refrigeração em condições de altas velocidades de corte, além da remoção de cavacos da zona de corte e proteção da máquina-ferramenta e da peça contra oxidação (MACHADO et al., 2011).

Machado et al. (2011) também classificam o método de aplicação dos fluidos de corte, que podem ser de três tipos: jorro a baixa pressão; sistema a alta pressão; e atomização. O jorro a baixa pressão, por sua simplicidade, é o método mais utilizado. No sistema de alta pressão, já se torna necessário a utilização de equipamentos mais complexos como bomba de múltiplos estágios e reservatório encapsulado na máquina-ferramenta devido ao fato do fluido precisar ser bombeado para então ser aplicado. E finalmente no método de atomização, também conhecido como MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante), o fluido é aplicado em vazões baixas (entre 10 ml/h a 200 ml/h), o que gera vantagem sobre o jorro devido ao seu maior poder de penetração e velocidade de fluido, mas também enfrenta dificuldades pela falta de consistência na aplicação (MACHADO et al., 2011).

Mittal, Kulkarni e Singh (2017) desenvolveram um trabalho sobre o efeito da lubrificação na resposta de usinagem e instabilidade dinâmica em microfresamento de alta velocidade da liga Ti-6Al-4V. O autor utilizou uma ferramenta de diâmetro de 300  $\mu\text{m}$  de diâmetro de carboneto de tungstênio não revestido. Os parâmetros de corte variaram entre uma rotação de 20000, 40000, 60000, 80000 e 100000 rpm, avanço de 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5 e 5,0  $\mu\text{m}/\text{aresta}$  e a uma profundidade de corte constante de 20  $\mu\text{m}$ . O Fluido utilizado no experimento foi o Hocut 795H com 10% de concentração.

Como pode-se observar na Figura 2.9, os autores (MITTAL; KULKARNI; SINGH, 2017) concluíram que há pouca variação de força quando submetidos a baixas rotações devido. Já em rotações mais elevadas, foi claramente percebido que houve uma significativa redução das

forças de corte, de 26% a 35% na condição de rotação de 60000 rpm. Os autores explicam o acontecimento de tal fenômeno pela redução do atrito com o uso de fluido lubrificante.

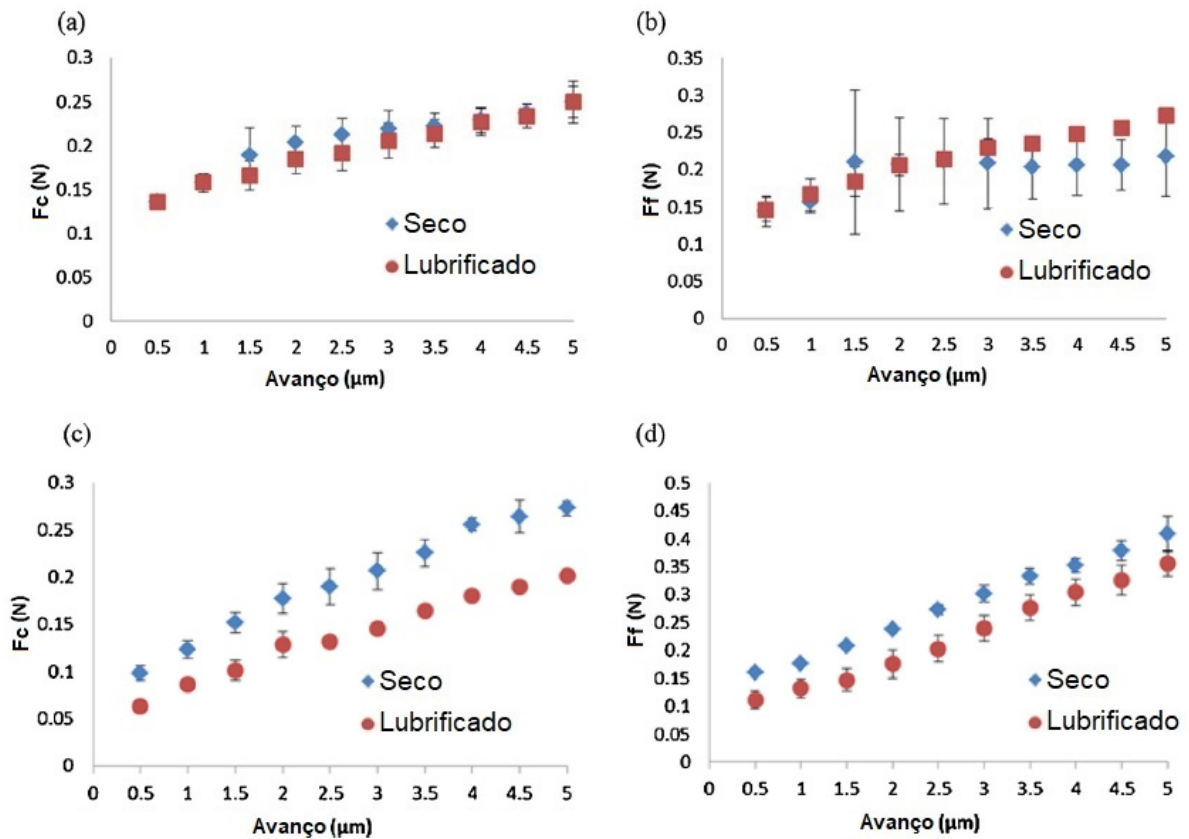


Figura 2.9: Comparação da força de corte ( $F_c$ ) e força de avanço ( $F_f$ ) para microfresamento a seco e com uso de fluido lubrificante sob as condições de (a) e (b) 20000 rpm e (c) e (d) 60000 rpm. (Adaptado de (MITTAL; KULKARNI; SINGH, 2017)).

Analisando ligas de Ti6Al4V, Vazquez et al. (2015) realizaram um estudo considerando os efeitos de refrigeração e lubrificação sob o processo de microfresamento. Neste estudo, os autores fizeram uso do método de microusinagem a seco, mas também utilizando emulsão convencional (jorro), MQL em direção favorável ao avanço e MQL na direção oposta ao avanço. Dessa forma, foi analisado o desgaste na ferramenta levando em consideração a perda no diâmetro da ferramenta e formação de cavaco. Pode-se observar analisando o desgaste que os ensaios utilizando o método MQL, tanto em direção favorável quanto oposta, apresentaram desgaste semelhante e pouco significativo, assim como a abordagem a seco. Entretanto, na técnica do jorro foi encontrado um valor cerca de três vezes maior quando comparado aos demais, perdendo aproximadamente 6% de seu diâmetro original. Sobre a formação de cavaco, como já esperado, os resultados obtidos adotando a metodologia MQL, para ambas situações, apresentaram resultados superiores em comparação aos outros. Porém, foi notada uma diferença significativa na abordagem a seco e no jorro, de forma que os resultados encontrados no jorro apresentaram valores 50% superiores ao em comparação. Os autores justificam tamanha ineficiência na técnica do jorro devido ao seu fluxo desordenado e sua incapacidade de atingir a pequena zona de corte.

Aslantas e Çiçek (2018) foram responsáveis pelo desenvolvimento de um trabalho levando

em consideração as técnicas de resfriamento e lubrificação no microfresamento de Inconel 718. Os autores performaram suas análises utilizando uma ferramenta de 600  $\mu\text{m}$  de diâmetro e os cortes foram feitos a seco, sob MQL, utilizando o método convencional e também com o uso de etanol. A velocidade de corte do experimento foi de 31,4 m/min, taxa de avanço de 40 mm/min e profundidade de corte de 0.1 mm. Dessa forma, levando em consideração a variação do diâmetro da ferramenta, há destaque para o MQL por apresentar a menor variação, seguida brevemente pelo processo convencional e pelo a seco, enquanto o de etanol apresenta desgastes expressivamente superiores. Os autores justificam esse acontecimento devido ao fato de que no microfresamento, mesmo o etanol resfriando a ferramenta, tal substância não é capaz de lubrificá-la, por isso o desgaste do diâmetro da ferramenta é máximo. Continuando a análise, Aslantas e Çiçek (2018) também ponderam a formação de rebarba durante o processo de microfresamento, como pode-se observar na Figura 2.10. Levanta isso em conta, os autores exaltam a superioridade do método MQL em comparação aos outros e também relatam uma ligeira vantagem do procedimento a seco em comparação ao convencional. E finalmente, assim como no desgaste da ferramenta, o etanol, de forma geral, apresentou os resultados menos satisfatórios.

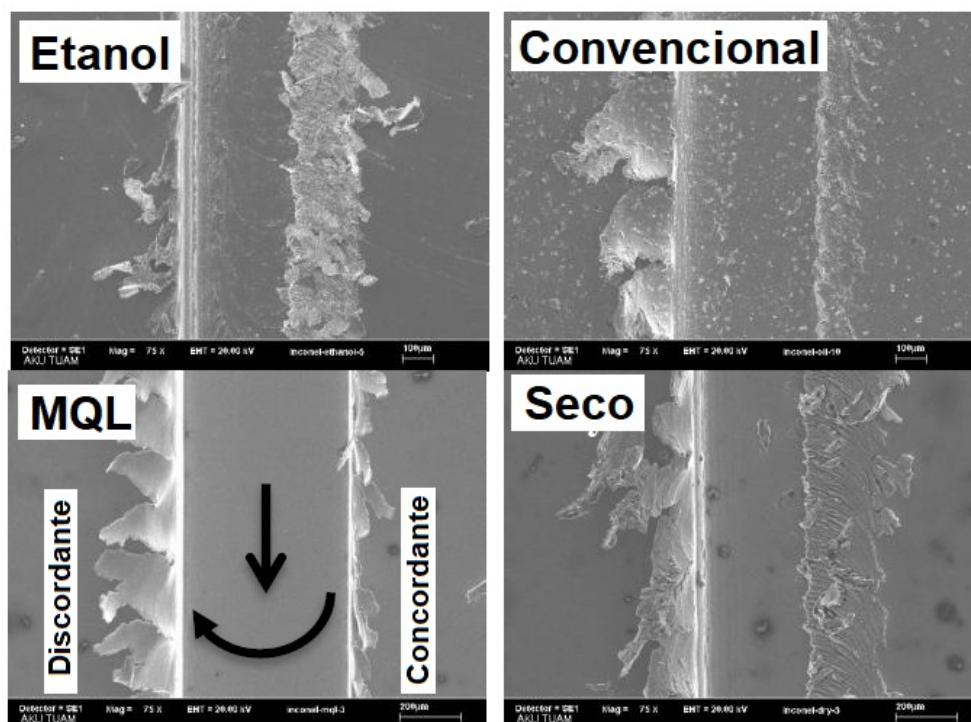


Figura 2.10: Formação de rebarba sob diferentes condições de resfriamento e lubrificação (Adaptado de (ASLANTAS; ÇIÇEK, 2018)).

### 2.2.3 Parâmetros de Corte

O processo de microusinagem em materiais de alta resistência é entendido como uma atividade desafiadora em virtude de sua imprevisibilidade, particularmente por conta do desgaste da ferramenta utilizada na execução. Conseqüentemente, sugere-se que para uma usinagem de alta qualidade sejam realizados estudos dos parâmetros de corte afim de encontrar condições as ótimas de tal atividade (ARAMCHAROEN; MANTIVENGA, 2009).

Aramcharoen e Mantivenga (2009) analisaram o microfresamento do aço ferramenta H13 (43 HRC) utilizando ferramentas de WC ultrafino de 900  $\mu\text{m}$  de diâmetro e trabalhando com os parâmetros de corte de: velocidade de avanço ( $v_f$ ) = 12 - 216 mm/min; rotação = 30000 rpm; profundidade de corte ( $a_p$ ) = 50  $\mu\text{m}$ . Foi observado pelos autores a diminuição da rebarba com aumento da razão entre a espessura de corte e o raio de aresta da ferramenta. Seguindo a ordem crescente de razões de 0,2, 1,0 e 2,0 as alturas de rebarba obtidas no estudo foram de 110, 50 e 30  $\mu\text{m}$  respectivamente.

Os mesmo autores Aramcharoen e Mantivenga (2009) seguem a análise e relatam os resultados obtidos em relação a rugosidade média ( $R_a$ ). Neste estudo foi encontrado uma rugosidade ótima variando a razão entre espessura do corte e raio de aresta da ferramenta entre 0,2 e 2,0. O ponto ótimo em questão possui  $R_a = 0,14 \mu\text{m}$  e foi encontrado junto a razão de 1,0. Para os valores de razão de 0,2 e 2,0 foram encontrados uma rugosidade média de 0,2 e 0,25  $\mu\text{m}$  respectivamente.

Dos Santos et al. (2015) foram responsáveis por um estudo de microfresamento de aço inoxidável duplex UNS 32205 utilizando microfresas de metal duro revestido com TiN de 381  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Foram utilizados pelos autores os seguintes parâmetros de corte:

- Avanço de corte: 2  $\mu\text{m}$ /volta e 3  $\mu\text{m}$ /volta;
- Profundidade de corte: 10  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$ ;
- Velocidade de corte: 20000 rpm e 30000 rpm.

O número total de ensaios foram oito. Os autores deram um excepcional destaque na formação de rebarbas, de forma a apresentarem valores consideravelmente grandiosos, em torno de 70  $\mu\text{m}$ . Entretanto, não foi possível encontrar uma interdependência ligado aos parâmetros de corte, que foi justificado pela alta complexidade do processo (DOS SANTOS et al., 2015).

Ademais, Dos Santos et al. (2015) também avaliaram a rugosidade dos canais proveniente do microfresamento. Os autores relatam uma insignificante variação de tal rugosidade diante da variação da velocidade de rotação. Também relatam uma pequena redução da rugosidade superficial com o aumento da rotação por dente de 2  $\mu\text{m}$  para 3  $\mu\text{m}$ . E finalmente, realçaram que a variação da profundidade de corte foi o principal fator para a rugosidade resultante no canal, uma vez que reduziu-se 0,01  $\mu\text{m}$  diante da redução da profundidade de corte de 30  $\mu\text{m}$  para 10  $\mu\text{m}$ .

### 2.2.3.1 Rugosidade Superficial

Como pôde ser observado, a rugosidade é um dos parâmetros da peça que terá grande influência dos parâmetros de corte. Esta grandeza é uma variação resultante de irregularidades finas ou erros microgeométricos provenientes da ação intrínseca do processo de corte (MACHADO et al., 2011). Com isso, a Figura 2.11 expõe a comparação de alguns processos de remoção de material levando em consideração a qualidade da superfície e o tamanho da peça.

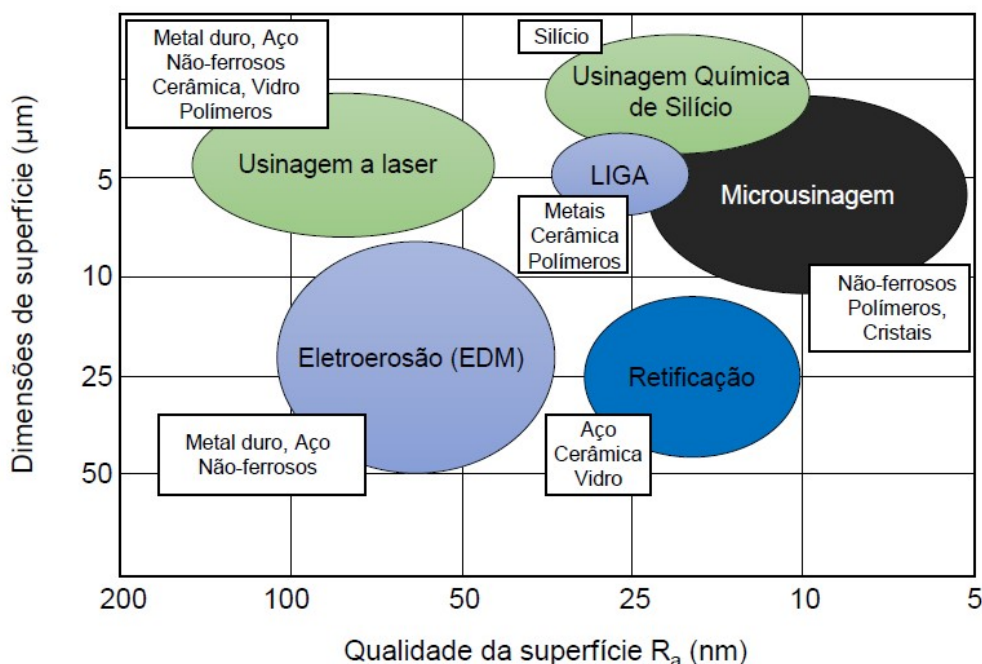


Figura 2.11: Comparação da qualidade da superfície referente a rugosidade média ( $R_a$ ) entre diferentes processos (Adaptado de Byrne, Dornfeld e Denkena (2003)).

Em microusinagem, a rugosidade superficial tem bastante relevância pois é um dos fatores determinantes para atingir-se uma usinagem de alta qualidade. Para atingir tal meta, deseja-se obter um valor de baixa rugosidade. Tal fator é altamente estudado por salientar o desempenho da usinagem (CHENG; HUO, 2013).

Machado et al. (2011) ressaltam que a rugosidade superficial originada de um processo de usinagem está fortemente relacionada a ação da máquina-ferramenta, das propriedades do material usinado, da geometria, do material da ferramenta e também da própria operação de usinagem.

Em microusinagem, outro fator que realça a importância de estudos para se obter uma rugosidade superficial baixa é a limitação quanto a aplicação de procedimentos de acabamento, como rebarbação, retificação e polimento. Devido ao tamanho reduzido, tais procedimentos tornam-se inviáveis, diferentemente da realidade da usinagem convencional (CHENG; HUO, 2013).

Bissacco, Hansen e Chiffre (2005) realizaram um estudo aplicado à fabricação de moldes para microinjeção de polímeros. Os autores relataram a dificuldade de desmontagem das peças poliméricas devido a elevada rugosidade dos componentes. Foi percebido que a alta rugosidade provia do efeito *ploughing* durante a usinagem das peças era o responsável por tal situação.

Ainda neste estudo, os mesmos discutiram a redução do raio de aresta de corte como possível alternativa para anular o problema da alta rugosidade. Entretanto, tal alternativa não foi possível de ser adotada devido à limitação do raio de aresta de corte estar intrínseco a fabricação da microfresa. Com isso, adotou-se o aumento do avanço por dente como solução. Os autores então mencionam uma melhora expressiva em relação a rugosidade da peça, levando



em consideração o efeito escala (BISSACCO; HANSEN; CHIFFRE, 2005).

Li e Chou (2010) realizaram um trabalho experimental utilizando aço H13 com o intuito de investigar a influência da variação das condições de corte na rugosidade superficial. Também foi analisado a influência do fluido de corte na usinagem, de forma a serem realizadas microusinagens a seco e MQL (Mínima quantidade de fluido). A Figura 2.12 apresenta os resultados encontrados e pode-se concluir que a variação do avanço e da rotação na condição seca e de MQL não foram capazes de influenciar a rugosidade superficial, de forma que tal rugosidade sofreu pouca variação durante os primeiros 48 mm de comprimento usinado. Os autores explicam que o aumento da rugosidade superficial na microusinagem a seco se dá pelo desgaste da ferramenta, fator reduzido ao se utilizar a técnica MQL. Também é relatado a quebra da ferramenta após o rompimento da barreira de  $90 \mu\text{m}$  de desgaste de flanco.

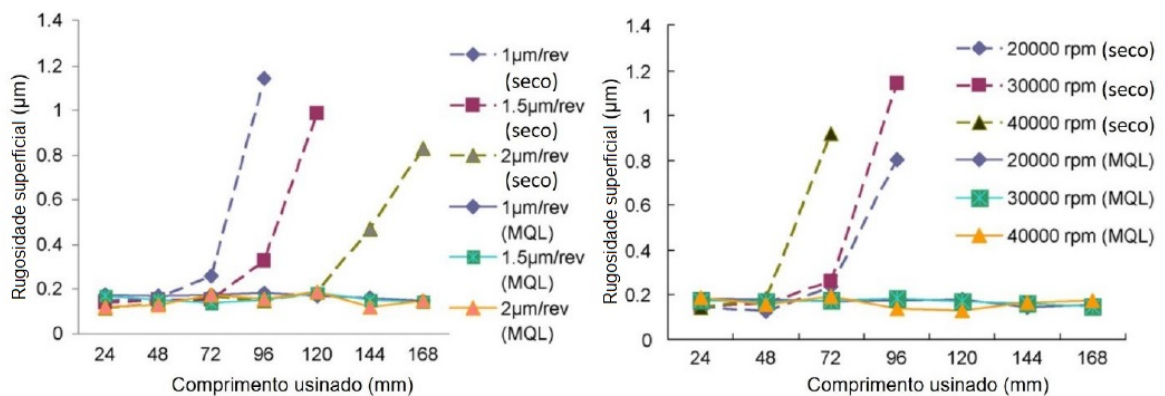


Figura 2.12: Rugosidade superficial em microfresamento a seco e MQL com (a) variação do avanço e rotação constante (30000 rpm) e (b) avanço constante ( $1 \mu\text{m}/\text{dente}$  e variação da rotação. (Adaptado de (LI; CHOU, 2010)).

Ziberov et al. (2016a) foram responsáveis por um estudo que avalia o microfresamento do material Ti-6Al-4V a seco e com a aplicação de fluido de corte utilizando a técnica MQL. Os autores ponderaram o desgaste da ferramenta utilizada e também o acabamento resultante de microusinagem. Foi constatado em algumas ferramentas um desgaste pelo mecanismo de adesão, resultante de uma usinagem de baixa velocidade de corte ( $10 \text{ m}/\text{min}$ ). Ademais, os autores relatam a formação de aresta postiça de corte estável na ausência do fluido de corte, fator que beneficia o desgaste a ferramenta porém gera um acabamento inadequado.

### 2.2.3.2 Formação de Rebarba

Aurich et al. (2009) afirmam que rebarba é um volume de material deformado plasticamente através de uma operação de corte ou cisalhamento, que não é removido. A geração de rebarbas é considerada complexa pois a deformação do material depende de uma série de fatores (KOU et al., 2015).

A formação de rebarbas pode-se tornar crítica em para peças fabricadas através do processo de usinagem devido ao fato do comprometimento das dimensões e funcionamento. No

caso da microusinagem, esse elemento se torna ainda mais crítico devido ao tamanho da rebarba ser relativamente maior se comparado com as condições de corte (avanço e profundidade de corte). Ademais, comparando com o processo convencional, a remoção de rebarbas é uma atividade inviável e com possibilidade de danificar e incorporar erros dimensionais e tensões residuais (LEE; DORNFELD, 2005).

Filiz et al. (2007) realizaram um estudo referente a formação de rebarbas em cobre comercialmente puro 101 utilizando microfresas de metal duro (carbeto de tungstênio). Foi verificado nesse trabalho que um menor avanço por dente ( $f_z$ ) proporcionou maiores rebarbas de topo independentemente da velocidade de corte utilizada na usinagem, como pode ser observado na Figura 2.13. Concluiu-se então que para velocidade de 40 m/min, o acréscimo de avanço reduziu a formação de rebarbas, enquanto na velocidade de 120 m/min não houve influência significativa na formação de rebarba pertinente ao acréscimo do avanço. Ademais, foi percebido uma relação de entre um maior desgaste da ferramenta e a maior formação de rebarba.

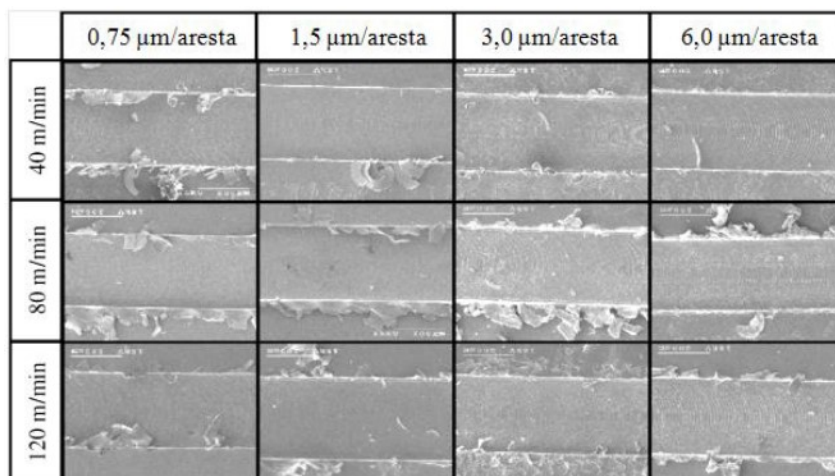


Figura 2.13: Rebarba formada diante de diferentes avanços e velocidades de corte (Adaptado de Filiz et al. (2007)).

Lekkala et al. (2011) realizaram a análise de um método para prever a altura e espessura de rebarbas com um erro previsto de 0,65% a 25,0%. O material a ser microfresado de alumínio Al2124 e aço inoxidável 304 com microferramentas de metal duro e diâmetro de 300 μm e 400 μm. A rotação, profundidade de corte e avanço foram variados e os autores concluíram que o maior diâmetro da aresta de corte da microfresa resultava na menor altura de rebarba no momento em que as outras condições permaneciam constantes. Outro resultado importante encontrado pelos autores foi a melhora da rebarba com o aumento do avanço.

Os autores Kumar, Kumar e Singh (2017) elaboraram um modelo analítico com o intuito de prever o tamanho das rebarbas resultantes do microfresamento do material Ti-6Al-4V com o aumento da rotação e avanço da ferramenta. Os resultados encontrados pelos autores apresentam uma diminuição da rebarba com o aumento das variações propostas como é possível observar na Figura 2.14.

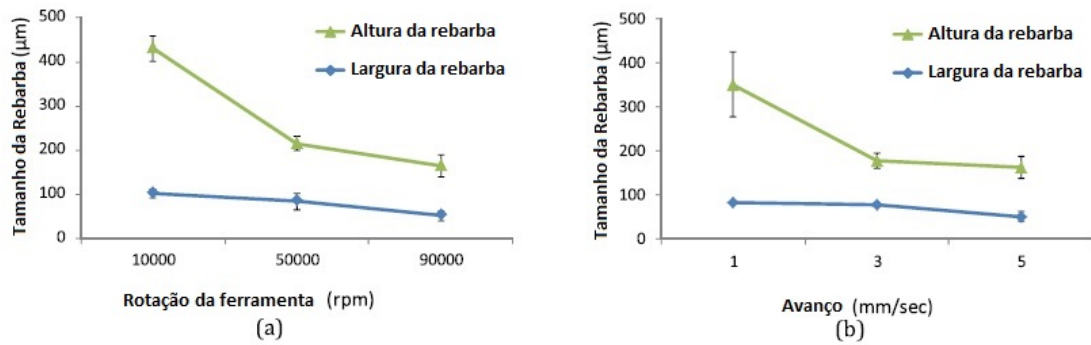


Figura 2.14: Tamanho da rebarba proveniente do aumento da rotação da ferramenta (a) e aumento do avanço (b). (Adaptado de Kumar, Kumar e Singh (2017)).

Ziberov (2018) foi responsável por um estudo de microfresamento da Liga Ti-6Al-4V utilizando ferramentas de diferentes revestimentos e utilização do método MQL. As ferramentas usadas possuíam diâmetro de  $152,4 \mu\text{m}$  feitas de metal duro e com revestimento de TiAlN e DLC. Os parâmetros de corte utilizados foram os mesmo para os procedimentos a seco e MQL: Rotação de 20000 rpm, velocidade de corte de  $9,6 \text{ m/min}$ , avanço por dente de  $0,1 \mu\text{m/dente}$ , avanço da mesa de  $4 \text{ m/min}$  e profundidade de corte de  $10 \mu\text{m}$  por um comprimento de  $4,2 \text{ mm}$ .

Os resultados encontrados pelo autor apresentam certa peculiaridade. Uma vez que na microusinagem a seco as alturas de rebarba foram inferiores as encontradas com a técnica MQL. Tal comportamento foi justificado pelo menor desgaste da ferramenta na ausência de lubrificante uma vez que se formou uma aresta postiça de corte estável, o que minimizou o desgaste porém gerou dano na superfície usinada (ZIBEROV, 2018).

Ziberov (2018) também analisou as formas de rebarba observadas em localizações específicas do microcanal durante o ensaio a seco, como pode-se observar na Figura 2.15. Onde foram observadas rebarbas na entrada e saída do canal, rebarbas de entrada lateral discordante e concordante, rebarbas de saída lateral discordante e concordante, além das rebarbas de topo. Ademais, o autor relata que somente foi possível analisar as rebarbas de topo discordante e concordante devido ao fato das demais estarem em condições mínimas.

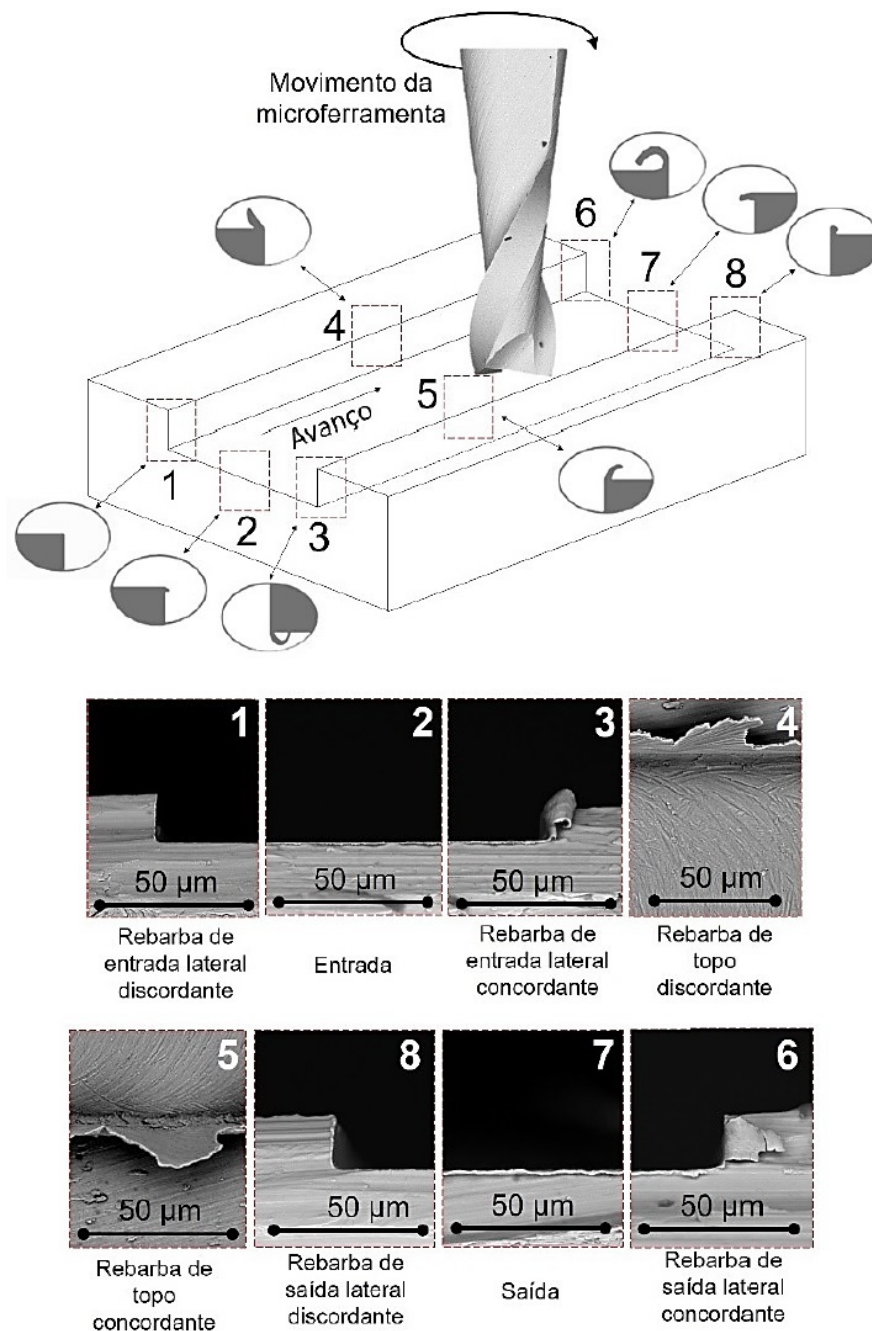


Figura 2.15: Forma e localização de rebarba geradas do microfresamento da Liga Ti-6Al-4V a seco (ZIBEROV, 2018).

Dos Santos (2016) foi responsável por um estudo de microfresamento de aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando microfresas de metal duto revestidas com TiN de  $381 \mu\text{m}$  de diâmetro. As condições de corte determinadas pela autora foram a de uma rotação de 20000 e 30000 rpm, velocidade de corte de 24 e 36 m/min, avanço por dente de 1,0 e  $1,5 \mu\text{m}$  e profundidade de corte de 30,0 e  $10,0 \mu\text{m}$ . Outro parâmetro levado em consideração na análise foi o uso de fluido de corte.

Ao utilizar 30000 rpm e fluido de corte, Dos Santos (2016) relata que no início do corte, em termos de comprimento usinado, as rebarbas foram maiores para os canais usinados com

fluidos de corte, no entanto para comprimentos usinados maiores a rebarba foi menor. A autora também relatou um maior comprimento de rebarba do lado concordante quando comparado ao discordante.

Nos ensaios de Dos Santos (2016), também foi analisado o tipo de rebarba formada no processo de microusinagem do material. A autora relata uma predominância de rebarba tipo pena e rebarba primária no processo, como pode-se observar na Figura 2.16. De forma que, nos ensaios realizados com velocidade de corte maior encontrou-se uma predominância da rebarba tipo pena quando o corte era a seco, porém com a presença de fluido tal predominância passou a ser da rebarba primária.

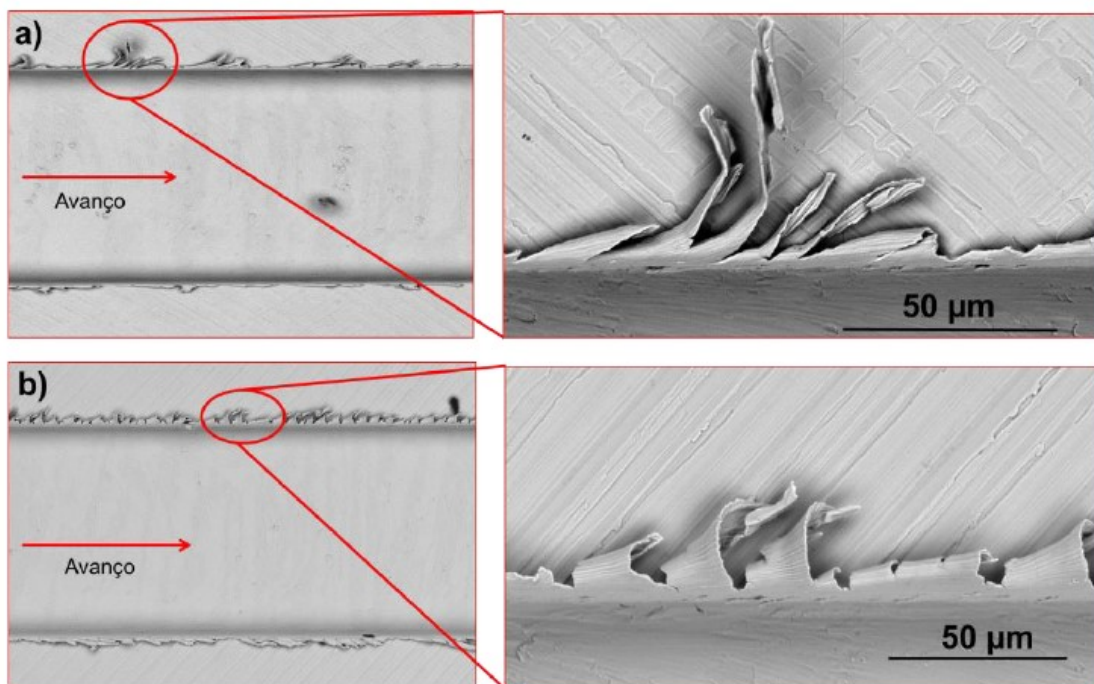


Figura 2.16: Formação de (a) rebarba tipo pena e (b) rebarba primária no microfresamento de aço inoxidável duplex UNS S32205. (Dos Santos (2016)).

### 2.3 Microfresamento de Inconel 718

Realçando o que já foi abordado anteriormente, o processo de microfresamento representa uma parte muito pequena dentro do plano de pesquisa de usinagem, menos de 4% dentro de todo o escopo de pesquisas sobre remoção de material, na forma convencional e com geometria definida. E somando a isto, têm-se o fato explícito na Figura 2.17, de que o Inconel, junto com algumas outras ligas metálicas, representa apenas 6% dos materiais estudados em microusinagem (CAMARA et al., 2012), entende-se a necessidade de estudos voltados ao microfresamento de tal material. De Oliveira (2019) comenta ainda que quando associados os valores mencionados, sobre microfresamento e o estudo de Inconel na microusinagem, conclui-se que a categoria de superligas na qual o Inconel 718 está incluso, quando voltado ao microfresamento, representa apenas 0,24% das pesquisas no ramo da usinagem.

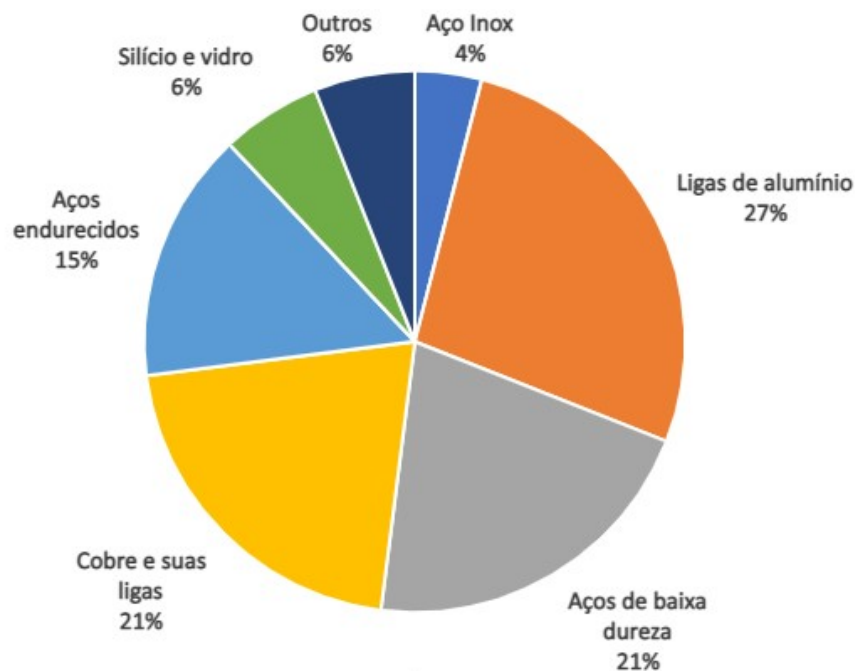


Figura 2.17: Materiais estudados em microusinagem. (Adaptado de Camara et al. (2012)).

Além da pequena quantidade de pesquisas direcionadas, deve-se ressaltar algumas das propriedades do Inconel 718, que o deixam em evidência em alguns setores da indústria. O Inconel 718 é uma liga metálica composta principalmente por níquel, ferro, cromo, molibdênio que foi desenvolvida para suportar uma gama variada de aplicações, com destaque à ambientes corrosivos e/ou a altas temperaturas. Tal material destaca-se devido às suas propriedades peculiares tais como a elevada resistência mecânica, resistência à fadiga e à fluência. Outros atributos importantes desse material são a sua alta resistência a corrosão e sua aplicabilidade contínua em ambientes de altas temperaturas. Entretanto, devido à essa combinação específica de propriedades, o Inconel 718 também possui a peculiaridade de ser um material de difícil usinagem (ASM, 1990).

Possuindo uma matriz austenítica endurecida por precipitação, o Inconel 718 tem a sua composição química apresentada na Tabela 2.1. De Oliveira (2017), em seu estudo, também trabalhou com esse material na forma envelhecida e em suas análises relata ter encontrado uma dureza de 532 HV para os corpos de prova.

Tabela 2.1: Composição química do Inconel 718 de acordo com Reed (2006).

<b>Elemento</b>	<b>% do elemento de liga com Reed (2006)</b>
Carbono	0,04
Alumínio	0,5
Titânio	0,90
Cromo	19,00
Ferro	18,50
Níquel	50,66
Nióbio	5,10
Molibdênio	5,30

Conforme mencionado, segundo (ASM, 1990), o Inconel 718 é um material reconhecidamente difícil de se usinar. Dentre os principais fatores de destaque para essa dificuldade, pode-se ressaltar, para o microfresamento (WANG et al., 2017):

1. Encruamento, altas temperaturas;
2. Elevadas taxas de desgaste da microfresa,
3. Dificuldade em gerar cavacos.

Ademais, sua matriz dúctil e com presença de carbonetos precipitados coerentes (de elevada dureza), dificulta ainda mais a microusinagem, uma vez que como as dimensões da ferramentas e os parâmetros de corte tem escala micrométrica, a presença desses precipitados torna-se ainda mais significativa (WANG et al., 2017).

Chae, Park e Freiheit (2006) discorrem que a falta de homogeneidade do material de forma a interferir na rugosidade e nas forças de corte. Além disso, Reed (2006) complementa relatando que Inconel 718 se trata de uma liga endurecida por envelhecimento, de forma que sua matriz seja relativamente dúctil com presença de carbonetos e precipitados duros, fator que dificulta mais ainda sua microusinagem.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Metodologia de pesquisa

Segundo Cooper e Schindler (2003), existem algumas classificações que podem ser aplicadas às pesquisas, inicialmente pode-se dividir em:

1. Pesquisas puras: buscam conhecimento teórico e resolução de problemas;
2. Pesquisas aplicadas: tem como objetivo a resolução de problemas com abordagem prática.

Considerando esta definição, é possível observar que a seguinte pesquisa pode ser classificada como aplicada, uma vez que objetiva-se obter os melhores parâmetros para o microfresamento do Inconel 718, de forma que essa seleção possa ser utilizada por outros pesquisadores e a indústria.

Para que isto seja realizado, adotou-se o método indutivo, de acordo com Zanella (2013) apud Lakatos e Marconi (1991) o método indutivo passa por três etapas. Inicialmente tem-se a observação dos fenômenos, com o objetivo de compreender o que causa cada um desses fenômenos, nesta pesquisa, entende-se por exemplo que ao observar as rebarbas formadas em uma peça, pode-se verificar causas de formação como: desgaste da ferramenta, falta de fluido de corte, parâmetros de corte insuficientes.

A segunda etapa consiste na correção entre os fenômenos, quando segundo Zanella (2013) “por meio da comparação, o investigador aproxima os fatos para descobrir a relação existente entre eles”. Desta forma, foram estudados os fatores que influenciaram de forma a tentar correlacioná-los com a qualidade final da peça de Inconel microfresada.

Por fim, a terceira etapa, propõe que sejam feitas generalizações (ZANELLA, 2013). Esta terceira etapa vai de encontro com os resultados esperados, onde pretende-se propor os melhores parâmetros, tipos de ferramentas e fluidos de corte para o microfresamento do Inconel 718.

Para realizar essas etapas, considerando que há poucas pesquisas em microfresamento de Inconel 718, o método de estudo de caso foi o foco. De acordo com Unileste (2005) o estudo de



caso diz respeito ao estudo detalhado de uma ou poucas situações, o autor ressalta ainda que é necessário cuidado na escolha dos “casos” para que sejam representativos.

Assim, utilizou-se ainda a metodologia teórica proposta por Flynn et al. (1990), onde são delimitadas as referências através da escolha das palavras-chave de busca, no caso dessa pesquisa os seguintes termos, apresentados na Tabela 3.1, em português e inglês foram utilizados, sendo que as mais específicas, ou seja, que abordam microfresamento de Inconel 718 foram usadas como estudo de caso, e as demais de forma a complementar as discussões.

Tabela 3.1: Termos utilizados para levantamento bibliográfico.

<b>Termo em português</b>	<b>Termo em inglês</b>
Microfresamento	Micromilling
Microfresamento de Inconel	Inconel Micromilling
Microusinagem	Micromachining
Microusinagem de Inconel	Micromachining of Inconel
Rebarbas em microfresamento	Micromilling burr
Acabamento em microfresamento	Micromilling finish
Fluido de corte em microfresamento	Cutting fluid in micromilling

Para o método de revisão bibliográfica, Maclure, Paudyal e Stewart (2016) enfatiza as razões para adoção de modelo de Revisão Sistemática da Literatura, que são:

- Identificar, avaliar e interpretar evidências de pesquisa disponíveis relevantes para um tópico específico;
- Ajudar a informar práticas e políticas, fornecendo evidências integradas e imparciais nas quais as decisões de baseiem;
- Identificar lacunas na literatura para informar estudos futuros;
- Minimizar tendências, usando métodos explícitos e sistemáticos, de forma a incluir decisões sobre a questão de revisão, critérios de inclusão, estratégia de busca, seleção de estudos, extração de dados, avaliação de qualidade, síntese de dados e planos de divulgação.

Garza-Reys (2015) reforça a criação de um mapa conceitual como uma forma clara e indutiva para organizar e categorizar os alvos de concentração de pesquisa. O autor ainda ilustra um modelo de mapa que segue na Figura 3.1.

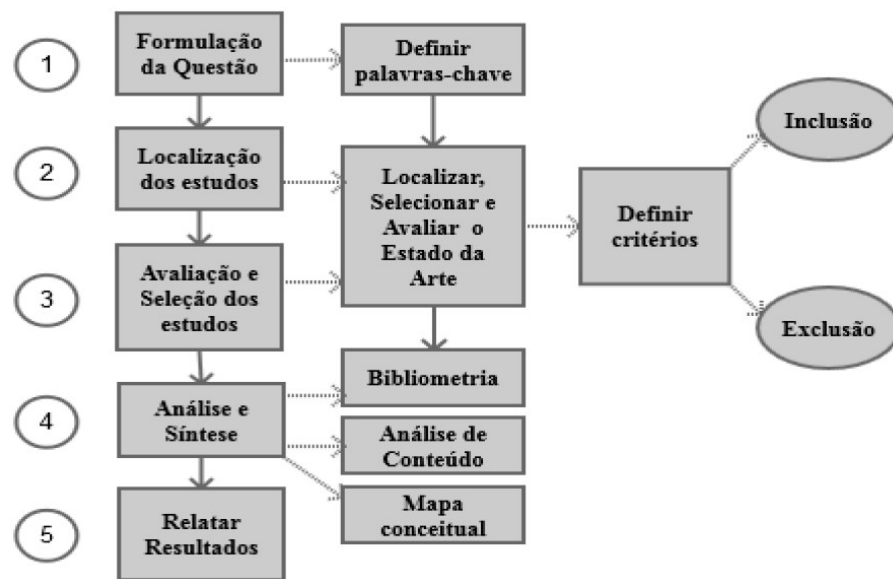


Figura 3.1: Modelo de Revisão Sistemática da Literatura (Adaptado de Garza-Reys (2015)).

Também seguindo os critérios para seleção para estudos de microfresamento de Inconel 718 recomendado por Kitchenham et al. (2010), pode-se apurar respostas para as seguintes perguntas:

- Os critérios de inclusão e exclusão da revisão descrita são adequados?
- A pesquisa bibliográfica cobriu todas informações de estudos mais relevantes?
- Os revisores avaliaram a validade dos estudos incluídos?
- Quais são os objetivos da revisão?
- Quais fontes utilizadas na identificação dos estudos primários? Houveram restrições?
- Quais foram os critérios de exclusão e inclusão e como eles foram aplicados?
- Que critérios foram utilizados para avaliar a qualidade dos estudos primários?
- Como foram os critérios de qualidade aplicados?
- Como foram os dados extraídos dos estudos primários?
- Como os dados foram sintetizados?
- Como as diferenças entre os estudos foram investigadas?
- Como os dados foram combinados?
- Foi razoável a combinação dos estudos?
- As conclusões decorrem as provas?

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Análise de estudos de microfresamento de Inconel 718

Ucun, Aslantas e Bedir (2013) realizaram um estudo investigando o efeito do revestimento no desgaste da ferramenta durante o microfresamento de Inconel 718. Nesse estudo foi utilizado uma microfresa de  $768 \mu\text{m}$  com raio de aresta de corte de  $2 \mu\text{m}$ . Os revestimentos utilizados foram: TiAlN+AlCrN, DLC, AlTiN, TiAlN+WC/C e AlCrN. Foi estabelecida a velocidade de corte de 48 m/min, os avanços variaram entre os valores de:  $1,25 \mu\text{m}/\text{aresta}$ ,  $2,50 \mu\text{m}/\text{aresta}$ ,  $3,75 \mu\text{m}/\text{aresta}$  e  $5,00 \mu\text{m}/\text{aresta}$ , já a profundidade de corte varia entre:  $100 \mu\text{m}$ ,  $150 \mu\text{m}$  e  $200 \mu\text{m}$ , e finalmente, o comprimento microfresado foi de 120 mm. Os autores encontraram como resultado um desgaste de flanco frequente devido ao desgaste abrasivo, ademais, encontrou-se fraturas locais nas arestas de corte e também nas arestas secundárias devido a fadiga e formação de aresta postiça de corte.

Os mesmo autores Ucun, Aslantas e Bedir (2013), no mesmo estudo ainda observaram uma expressiva redução na taxa de desgaste nas ferramentas revestidas em comparação as não revestidas. Outro fator positivo relatado referente ao revestimento foi a menor redução do diâmetro da aresta de corte. Além disso, na contramão do processo convencional, observou-se maiores desgastes para menores avanços e pequenas profundidades.

Ainda no mesmo trabalho, Ucun, Aslantas e Bedir (2013) consideraram o uso de lubrificante para analisar o comportamento da usinagem. Foi utilizado o óleo vegetal Coolube 2210 através da via técnica MQL a uma vazão de 150 ml/h. Consequentemente, os autores mencionam o aumento da vida útil da ferramenta e uma redução na adesão de cavacos.

Já o estudo feito por Wang et al. (2017) consiste em um trabalho computacional referente a microusinagem de Inconel 718, como pode-se observar na Figura 4.1. Os autores realçam a existência de uma quantidade considerável de estudos referentes ao material proposto, porém ainda há um deficit no seguimento de microfresamento do Inconel. O que torna a compreensão dos fenômenos presentes na microusinagem desse material parcialmente limitada.

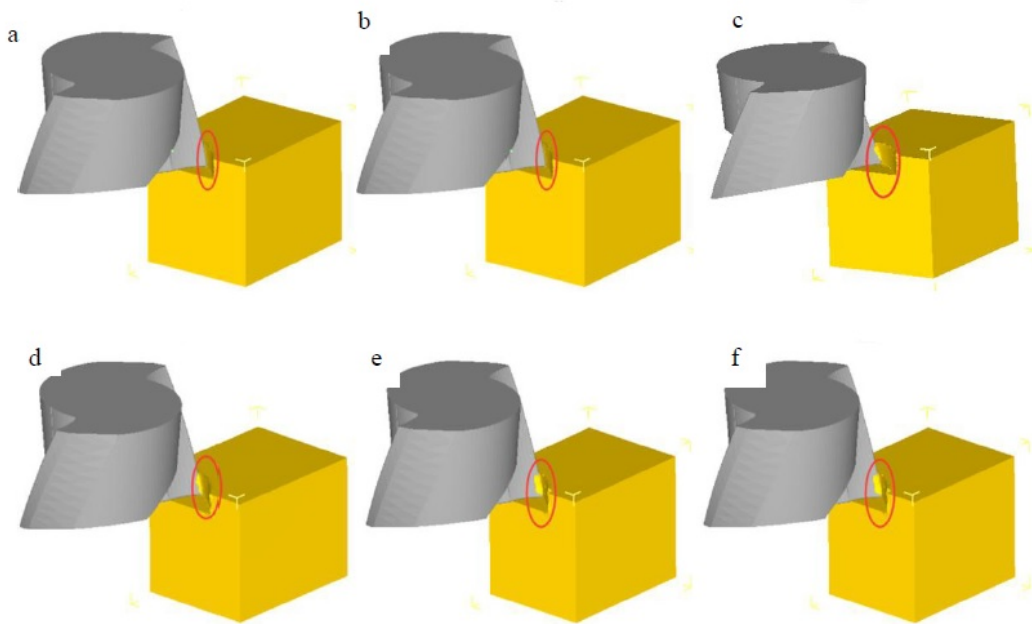


Figura 4.1: Simulação de formação de cavaco a um avanço de (a)  $0,5 \mu\text{m}$ , (b)  $1,0 \mu\text{m}$ , (c)  $1,5 \mu\text{m}$ , (d)  $2,0 \mu\text{m}$ , (e)  $3,0 \mu\text{m}$  e (f)  $4,0 \mu\text{m}$  (Adaptado de Wang et al. (2017)).

No estudo de Wang et al. (2017) foi utilizado um modelo tridimensional em elementos finitos de uma fresa de  $500 \mu\text{m}$  e raio de ponta de  $5 \mu\text{m}$ . Os resultados obtidos nas simulações salientaram que ao aumentar a penetração de trabalho ou avanço por dente e manter os outros parâmetros de corte constantes, a força de corte irá aumentar. Os autores também encontraram um avanço por dente crítico ( $1,5 \mu\text{m}$ ) nos quais valores inferiores não são capazes de realizar remoção do material, mas apenas deforma-los. Foi recomendado então, para uma operação ideal, um avanço superior ao crítico e uma penetração mínima de trabalho para uma redução de força no processo de microfresamento.

De Oliveira (2019) foi responsável por um estudo de efeito escala e integridade superficial no microfresamento de Inconel 718. A ferramenta utilizado pela autora foi uma MS2MSD0040 (MITSUBISHI, 2018) de  $400 \mu\text{m}$  de diâmetro feita de metal duro revestido de (Al, Ti)N. Foram analisados ensaios a seco e com fluido de corte para então estabelecer a melhor condição. Para a microusinagem a seco, foram realizados 6 ensaios onde a rotação variou de 20000, 40000 e 60000 rpm, a velocidade de corte de 25,1, 50,3 e 75,4 m/min, avanço de 0,1, 1,0 e  $5,0 \mu\text{m}/\text{dente}$  e profundidade de corte constante a  $20 \mu\text{m}$ . Já para os ensaios utilizando fluido de corte, os parâmetros de corte dos 4 ensaios tiveram a rotação variando entre 11000 rpm, 20000 rpm, 40000 rpm e 60000 rpm, velocidade de corte entre 13,8 m/min, 25,1 m/min, 50,3 m/min e 75,4 m/min, um avanço constante de  $5,0 \mu\text{m}/\text{dente}$  e uma profundidade de corte também constante de  $40 \mu\text{m}$ . Todos os canais usinados tiveram um comprimento de 15 mm.

Na usinagem a seco, como pode-se observar na Figura 4.2, De Oliveira (2019) constatou um elevado nível de desgaste das ferramentas, o que reflete diretamente no acabamento do canal usinado. Foi testemunhado a ocorrência do fenômeno de recuperação elástica do material usinado, acúmulo de material na ponta da microfresa, perda da aresta de corte e também perda

de coesão do revestimento. Como já esperado, nesse estudo foi constatado uma redução nas rebarbas com o aumento da velocidade de corte.

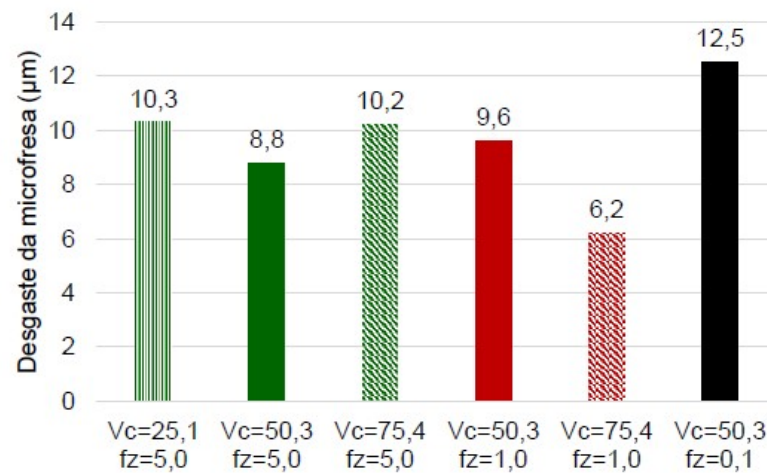


Figura 4.2: Valores de desgaste em função do diâmetro da ferramenta relacionados aos parâmetros de corte a seco (De Oliveira (2019)).

Já no processo com fluido de corte, De Oliveira (2019) constatou o resultado da transição de zonas com fluido de corte suficiente e não suficiente, como pode-se observar na Figura 4.3. Foi percebido uma melhora de qualidade na formação do canal de forma a não apresentar material aderido no fundo do canal, tampouco rebarbas no fundo e do lado discordante do canal e redução das marcas de avanço. A autora também confirmou a redução das forças de usinagem no processo com fluido de corte quando comparado com o a seco. Com isso, a autora reconheceu um ganho no comprimento usinado até o fim de vida quando a microusinagem é realizado com fluido de corte.

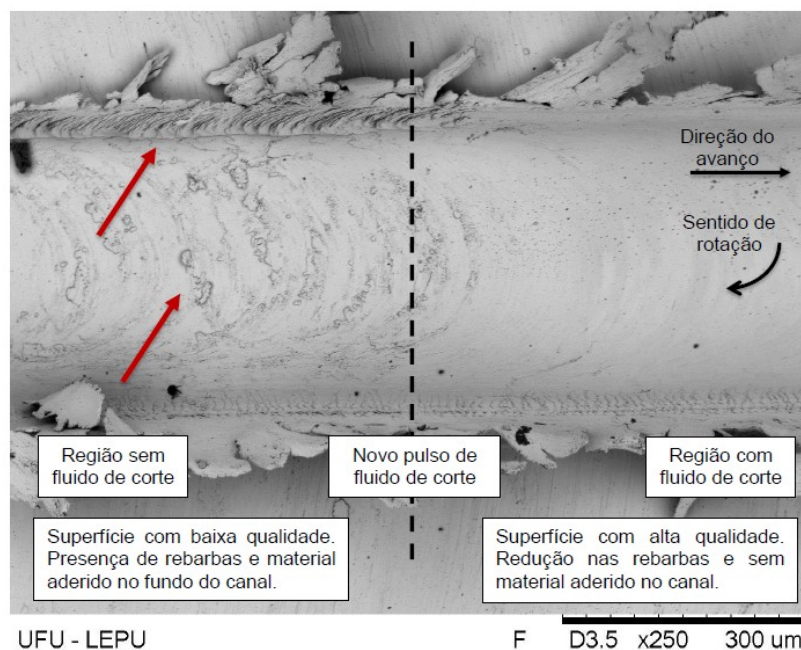


Figura 4.3: Transição de zona com fluido de corte insuficiente para zona com fluido de corte suficiente (De Oliveira (2019)).

Finalmente, De Oliveira (2019) conclui que os valores de rugosidade obtidos foram baixos, mas deu destaque para a velocidade de corte de 50,3 m/min. Também reafirma a não formação de rebarbas no fundo dos canais. A autora também tentou relacionar a qualidade da usinagem relacionando a acústica e as vibrações do processo, entretanto não foi possível correlacionar os sinais devido ao fato de cada ensaio apresentar uma significância para um parâmetro diferente.

Kiswanto, Azmi e Ko (2019) foram responsáveis por desenvolver um estudo referente a análise de superfície pós microfresamento em baixas velocidades de Inconel 718. Utilizando ferramentas revestidas de TiAlN de 1 mm de diâmetro, profundidade de corte constante de 10  $\mu\text{m}$  e comprimento de usinagem também constante e com valor de 15mm, os autores variaram a velocidade de corte (9,43 m/min, 22,00 m/min e 31,43 m/min) e o avanço (0,5 mm/s, 1 mm/s e 2 mm/s). Resultando em um total de 9 variações de parâmetro.

Após a usinagem de todas as variações, a amostra que resultou com a maior rugosidade superficial foi onde se utilizou uma velocidade de corte de 9,43 m/min combinado a um avanço de 2 mm/s. Do contrario, o trecho microfresado com uma velocidade de corte de 31,43 m/min conjugado a um avanço de 0,5 mm/s resultou na menor rugosidade superficial (KISWANTO; AZMI; KO, 2019). Os demais resultados obtidos na análise podem ser observados nas Figura 4.4 e Figura 4.5.

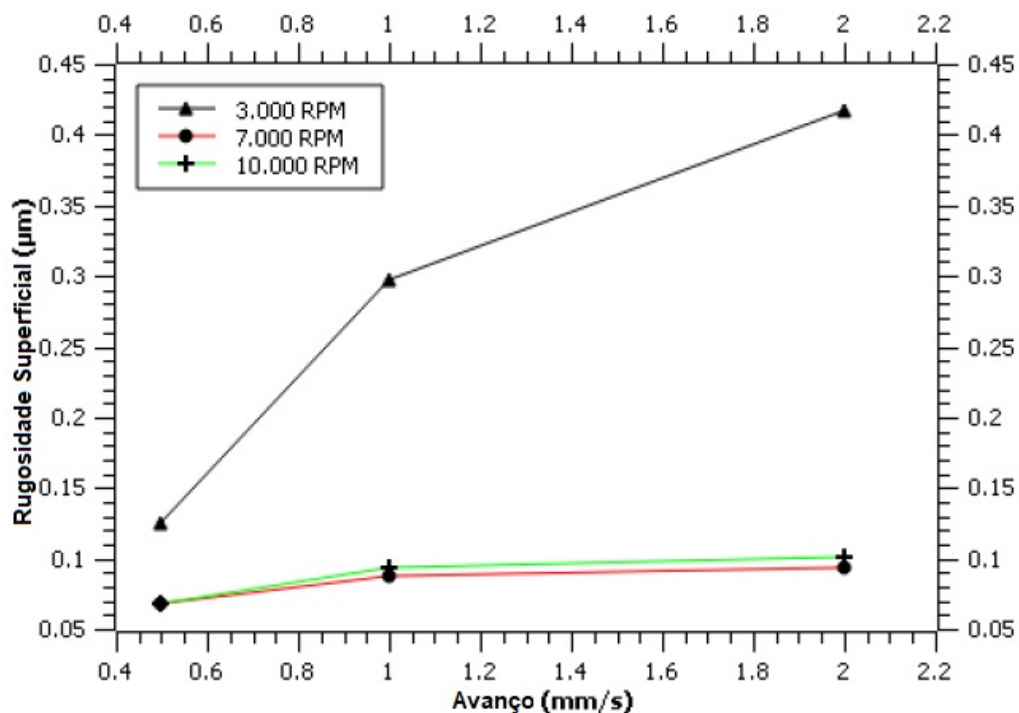


Figura 4.4: Influência do avanço na rugosidade superficial (Kiswanto, Azmi e Ko (2019)).

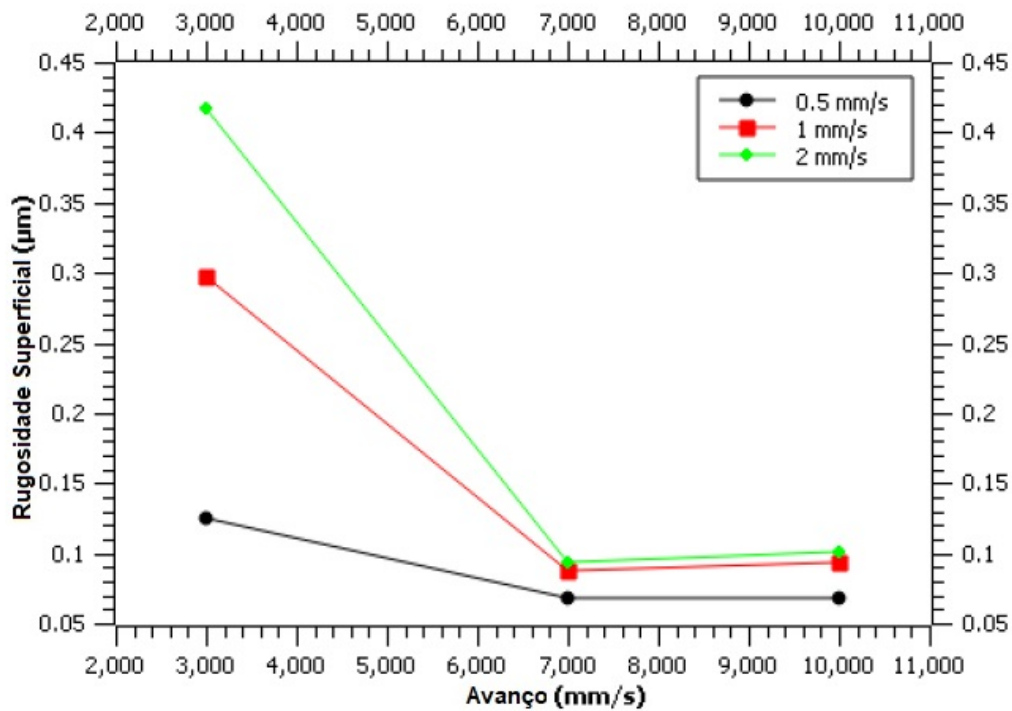


Figura 4.5: Influência da velocidade de corte na rugosidade superficial (Kiswanto, Azmi e Ko (2019)).

Como conclusão do estudo, Kiswanto, Azmi e Ko (2019) depreenderam que altos avanços produzem altas rugosidades superficiais e altas velocidades de corte resultam em rugosidades superficiais pequenas. Tal fenômeno ocorre devido a redução ou aumento da força de corte diante da quantidade de material expelida por dente durante o processo de microfresamento.

Ucun, Aslantas e Bedir (2015) executaram, também, um trabalho relacionado ao microfresamento de Inconel 718. Instrumentados com ferramentas sem revestimento e ferramentas com revestimento DLC (*Diamond Like Carbon*) de 760  $\mu\text{m}$  de diâmetro, os autores microusinaram canais com um total de 120 mm de comprimento. Utilizando uma rotação constante de 20.000 rpm a seco, um avanço variante (1,25  $\mu\text{m}$ , 2,5  $\mu\text{m}$ , 3,75  $\mu\text{m}$  e 5,0  $\mu\text{m}$  por aresta) e uma profundidade de corte também variante (0,1  $\mu\text{m}$ , 0,15  $\mu\text{m}$  e 5,0  $\mu\text{m}$ ) como parâmetros de corte, foram microfresados um total de 12 amostras com preceitos distintos para cada modelo de ferramenta.

As análises posteriores a microusinagem dos canais se deram no âmbito da redução de diâmetro da ferramenta, rugosidade superficial e formação de rebarba. Ucun, Aslantas e Bedir (2015) relatam que para ferramentas sem revestimento e com revestimento DLC, o maior desgaste constatado foi ao microfresar a amostra de 0,1 mm de profundidade de corte combinada com avanço de 1,25  $\mu\text{m}$  por dente, como pode-se observar na Figura 4.6. Tal fenômeno foi justificado pelos autores devido a espessura fresada ser inferior a espessura mínima de corte, resultando no aumento de temperatura do processo e também na formação de arestas postíças.

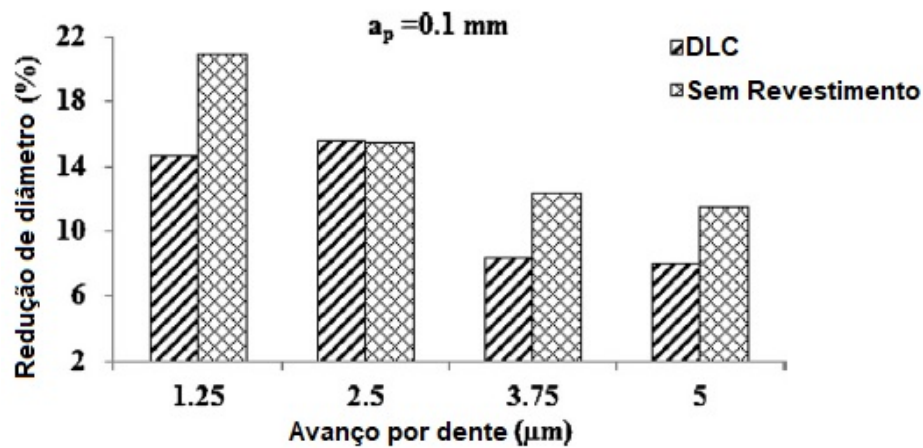


Figura 4.6: Variação de diâmetro de ferramenta de acordo com avanço (Ucun, Aslantas e Bedir (2015)).

A avaliação feita levando em conta a rugosidade superficial apresentou resultados peculiares e diferentes do esperado. Na Figura 4.7, Ucun, Aslantas e Bedir (2015) destacam os valores da rugosidade superficial da ferramenta sem revestimento utilizando os avanços de 3,75 e 5,0  $\mu\text{m}$ , onde o esperado era que o valor obtido para 5,0  $\mu\text{m}$  fosse superior ao de 3,75  $\mu\text{m}$ . Outro resultado singular foi a rugosidades de canais de 10 mm de comprimento apresentem maiores irregularidades quando comparados à alguns de 120 mm, salientando o inesperado.

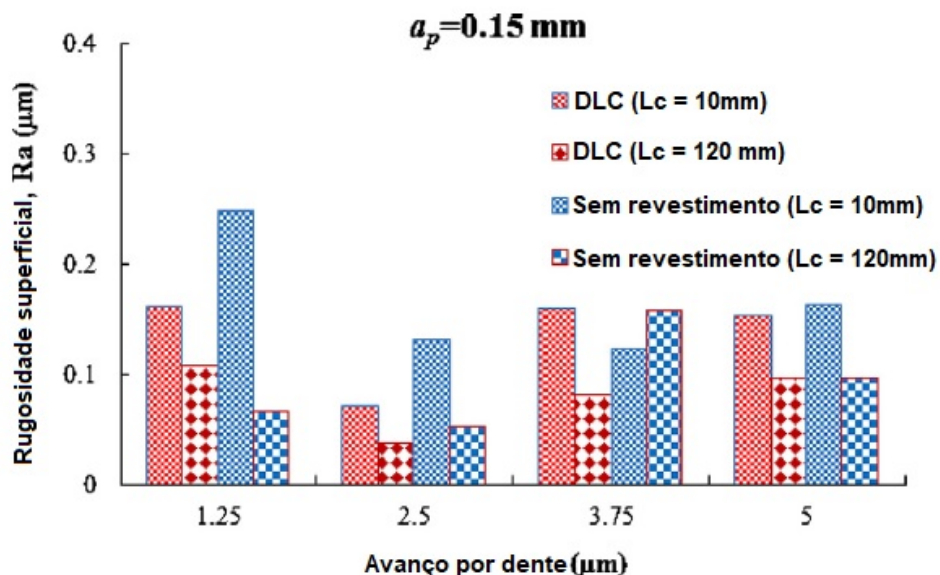


Figura 4.7: Rugosidade superficial de acordo com avanço (Ucun, Aslantas e Bedir (2015)).

Ao levar em consideração o aumento do raio da aresta de corte da ferramenta de acordo com o aumento do avanço, Ucun, Aslantas e Bedir (2015) testemunharam o já esperado. A Figura 4.8 apresenta os resultados encontrados com uma espessura de corte de 10 mm e confirmam a ampliação do raio da aresta de corte de acordo com a variação progressiva do avanço.



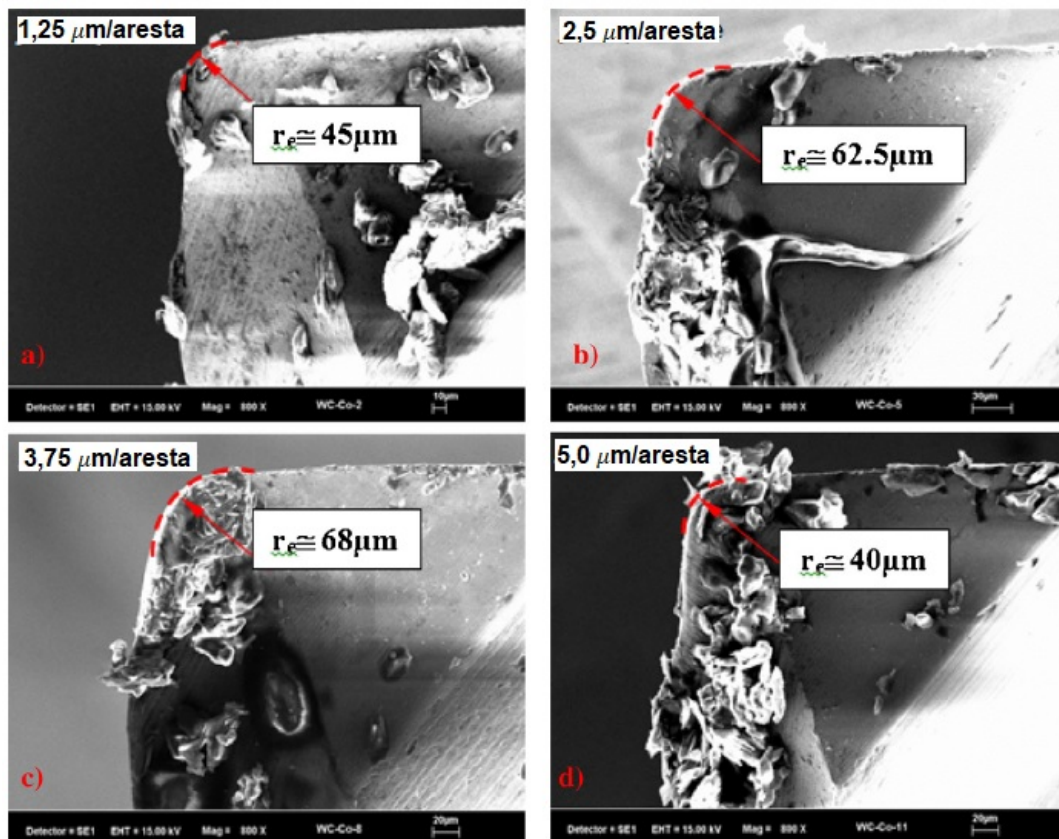


Figura 4.8: Variação do raio de aresta com taxa de avanço para ferramenta sem revestimento após processo de corte de 120 mm (Ferramenta sem revestimento) (Ucun, Aslantas e Bedir (2015)).

Dando mais detalhes ao trabalho de Aslantas e Çiçek (2018) já citado na Subseção 2.2.2, que aborda a variação de métodos de lubrificação ao microfresar Inconel 718. Os fluidos lubrificantes utilizados nos experimentos foram o Etanol, óleo de base vegetal DuALL Al 2100 para o método de lubrificação convencional e MQL, e também o método a seco. Uma das análises presente no estudo foi o comportamento da ferramenta durante o processo de usinagem onde todos os canais do estudo possuem o mesmo comprimento usinado. Destacam-se, nesse caso, o processo com MQL, pela redução mínima de raio da ferramenta, e o com Etanol, pelo oposto resultado. Ademais, como pode-se observar na Figura 4.9, no procedimento com Etanol os autores consideraram como abrupto a redução do diâmetro da ferramenta durante o processo. Tal fenômeno foi justificado pela ineficiência da substância em reduzir o desgaste abrasivo por conta de seu insuficiente efeito lubrificante.

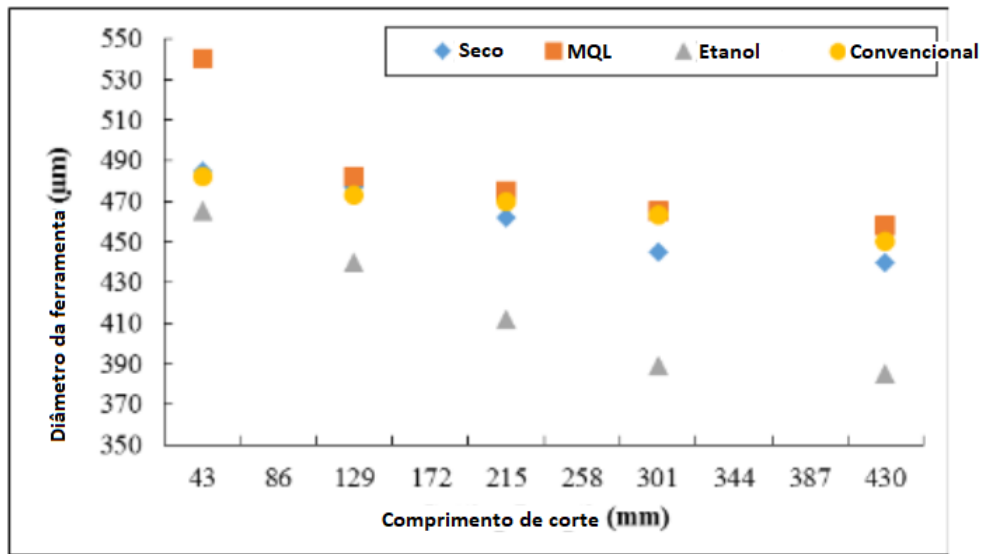


Figura 4.9: Variação do diâmetro de ferramenta de acordo com o comprimento de usinagem sob diferentes condições de corte (Aslantas e Çiçek (2018)).

A análise visual das ferramentas também fez parte da análise realizadas pelos autores. Na Figura 4.10 nota-se o estado de caga ferramenta referente a sua respectiva microusinagem. Aslantas e Çiçek (2018) realçam o desgaste circunferencial dos instrumentos assim como o aumento da aresta de corte resultante do desgaste abrasivo proveniente no processo.

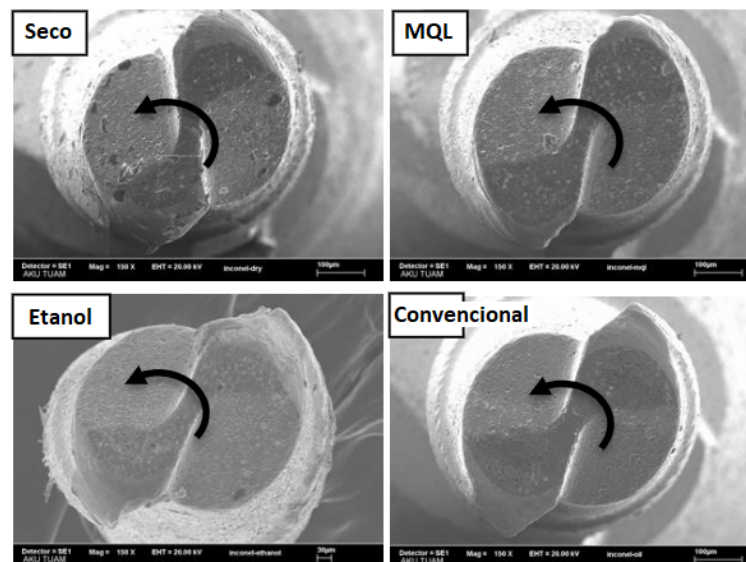


Figura 4.10: Estado das ferramentas pós microusinagem sob diferentes condições de corte (Aslantas e Çiçek (2018)).

Sobre o balanço feito levando em consideração a rugosidade superficial, como nota-se na Figura 4.11, o processo utilizando Etanol como fluido de corte também apresentou o maior índice de rugosidade superficial. De maneira análoga, no método MQL evidenciou-se os menores valores. Ainda sobre a rugosidade superficial, os autores destacam a tamanha disparidade entre os métodos a seco e com lubrificação convencional. Tal ocorrência fundamenta-se na explicação

de que o óleo gera uma estrutura instável na superfície, impedindo a remoção de cavacos e aderindo os mesmos a ferramenta (ASLANTAS; ÇIÇEK, 2018).

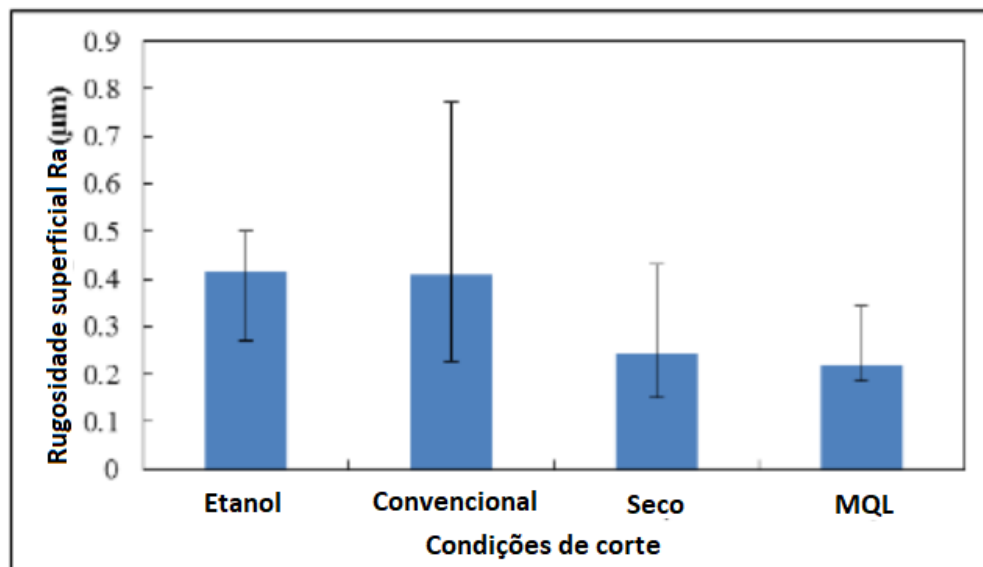


Figura 4.11: Variação do diâmetro de ferramenta de acordo com o comprimento de usinagem sob diferentes condições de corte (Aslantás e Çiçek (2018)).

Outro parâmetro analisado por Aslantás e Çiçek (2018) foi a formação de rebarba em relação ao comprimento de usinagem. Os autores relatam que a quantidade de rebarbas no lado do fresamento discordante é menor do que no lado do fresamento concordante, como observa-se na Figura 4.12 e Figura 4.13. Tal fenômeno é justificado pela presença do efeito *ploughing*, com exceção do MQL que apresenta o menor montante de rebarbas. Conseqüentemente, ao obter-se uma menor lubrificação com o etanol, aumenta-se o desgaste da ferramenta e da aresta de corte, fatores que promovem o efeito *ploughing*.

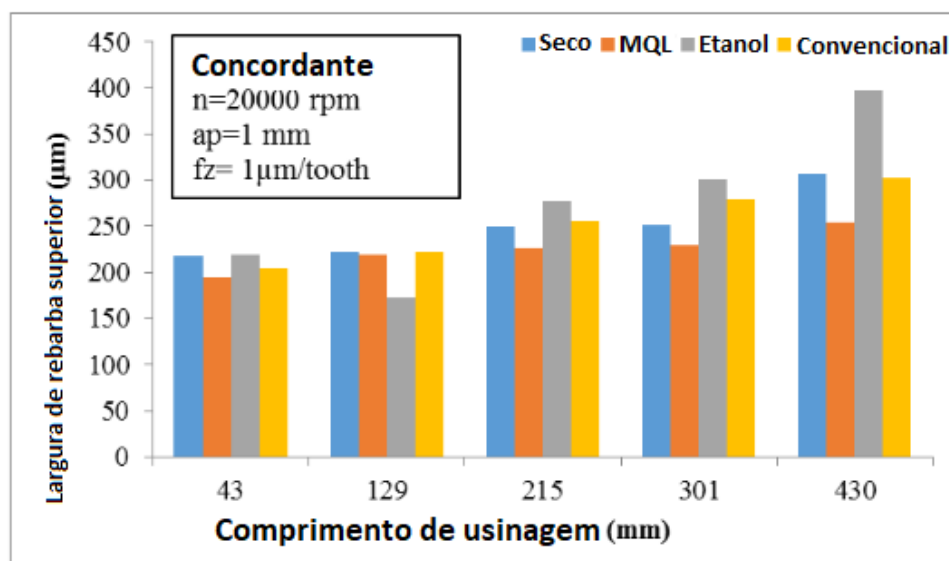


Figura 4.12: Variação da largura de rebarba em relação ao comprimento de usinagem sob condições de corte distintas no sentido concordante. (Aslantás e Çiçek (2018)).

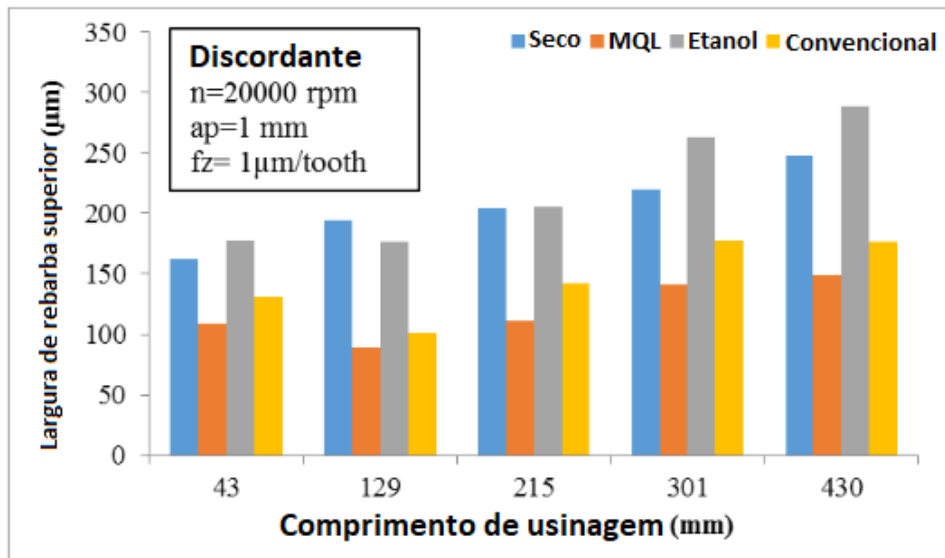


Figura 4.13: Variação da largura de rebarba em relação ao comprimento de usinagem sob condições de corte distintas no sentido discordante. (Aslantas e Çiçek (2018)).

dos Santos et al. (2021) foram idealizadores de um estudo discorrendo sobre a formação de rebarba devido ao microfresamento do Inconel 718 e também do aço inoxidável duplex UNSS32205. Para a microusinagem de Inconel 718, os autores utilizaram uma microfresa de  $381 \mu\text{m}$  de diâmetro revestida de TiN com raio de aresta de  $1 \mu\text{m}$ . Os ensaios realizados utilizaram 2 fluidos lubrificantes, Vasco 1000 e Óleo sintético Quimatic Superfluido 3, sob a condição de submersão, além da usinagem a seco. Os parâmetros de corte adotados para tais experimentos foram constantes afim de aferir a eficiência da lubrificação. Sendo a velocidade de corte de  $36 \text{ m/min}$ , o avanço de  $1,5 \mu\text{m}/\text{aresta}$  e a profundidade de corte de  $0,03 \text{ mm}$ .

Os resultados colhidos para o microfresamento de Inconel 718 referentes a formação de rebarba do lado concordante e discordante estão apresentados na Figura 4.14. Os autores relatam que para todas as condições de corte obteve-se uma formação de rebarba menor do lado discordante quando comparados ao concordante independentemente das condições de corte. dos Santos et al. (2021) complementam defendendo que a utilização do fluido de corte propiciou a menor formação de rebarba, de forma a atuar como lubrificante e reduzir o atrito durante o processo de remoção de material. Como conclusão, pode-se averiguar no estudo a eficiência do método de lubrificação por submersão diante da considerável diferença entre o processo a seco e o submerso por fluido de corte (DOS SANTOS et al., 2021).

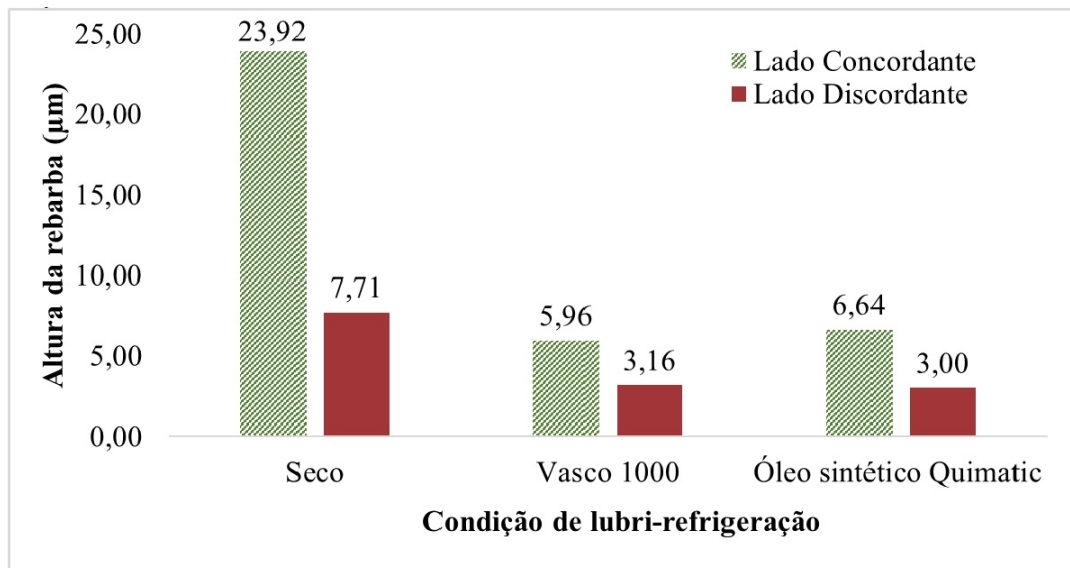


Figura 4.14: Diferença entre a altura da rebarba na usinagem do INCONEL 718 a seco e nas condições de aplicação de fluido submersa utilizando-se Vasco 1000 e óleo sintético (dos Santos et al. (2021)).

Sadiq et al. (2018) foram idealizadores de um estudo realizado investigando o micro-fresamento de Inconel 718 feito por manufatura aditiva de *Selective Laser Melting* (SLM). Na Figura 4.15 observa-se a condição de tal material após sua fabricação. Os autores realçam que o objetivo da análise encontra-se nos efeitos de revestimento de ferramenta, parâmetros de fresamento, rugosidade superficial e desgaste de ferramenta.

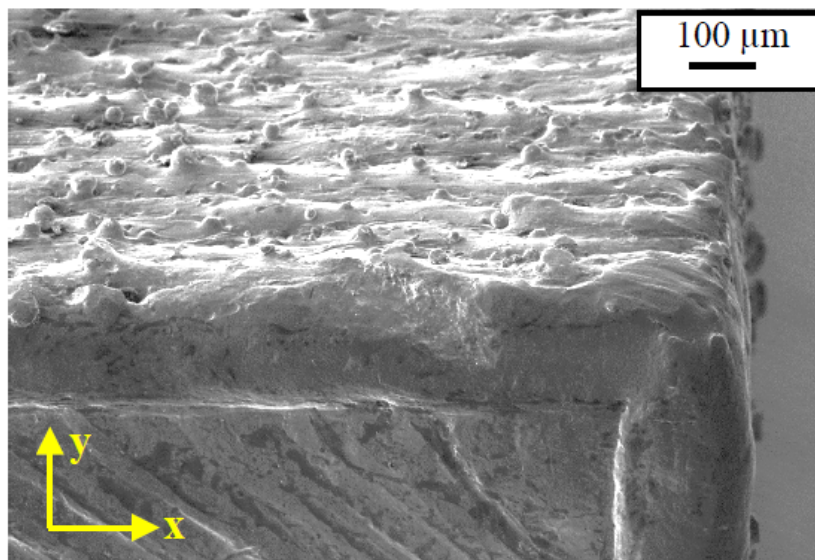


Figura 4.15: Superfície de Inconel 718 fabricado pro manufatura aditiva após a soldagem (Sadiq et al. (2018)).

Foram aditivamente impressos blocos de Inconel 718 suficientes para a realização dos testes. A ferramenta utilizada no experimento possui diâmetro de 508 µm com raio de aresta de 3,175 µm e revestimento variando entre  $AlTiN$ ,  $AlTiN/Si_3N_4$  (NanoTek) e sem revestimento.

As velocidades de corte da ferramenta alternaram-se entre os valores de 14 e 19 m/min. Já o avanço da mesma oscilou entre 0,8 e 1,2  $\mu\text{m}/\text{aresta}$ . A profundidade de corte e o comprimento usinado de todos os canais mantiveram-se constantes com valores de 0,02 mm e 480 mm respectivamente. O método de lubrificação de ferramenta e óleo utilizado também não variaram diante do microfresamento das amostras, sendo o MQL de Coolube2200 EP o respectivo método e lubrificante (SADIQ et al., 2018).

Para as ferramentas sem revestimento, Sadiq et al. (2018) constata uma performance não satisfatória uma vez que os valores de rugosidade superficial sofreram expressivas variações. Tais valores obtidos apresentaram uma significativa melhora de acabamento de superfície quando comparado a condição inicial, porém ainda elevados quando comparados a outros estudos e as condições encontradas nas ferramentas com revestimento. Os autores citam a medida de menos de 6  $\mu\text{m}$  para a melhor condição de rugosidade superficial do acabamento gerada diante da condição de ferramenta sem revestimento, velocidade de corte de 14 m/min e avanço de 1,2  $\mu\text{m}/\text{aresta}$ . Tal fenômeno é justificado pelos autores devido ao alto desgaste da ferramenta após os primeiros 45 mm de comprimento de usinagem.

Já para as ferramentas com revestimento, foram encontradas condições de acabamento superficial expressivamente inferiores quando comparadas as ferramentas sem revestimento. Os autores relatam a existência de uma rugosidade com valores inferiores a 2  $\mu\text{m}$  em determinados pontos dos canais. As Figura 4.16 e Figura 4.17 transmitem as condições encontradas após o processo de microfresamento, atestando assim, a expressiva superioridade das ferramentas com revestimento em comparação as não revestidas.

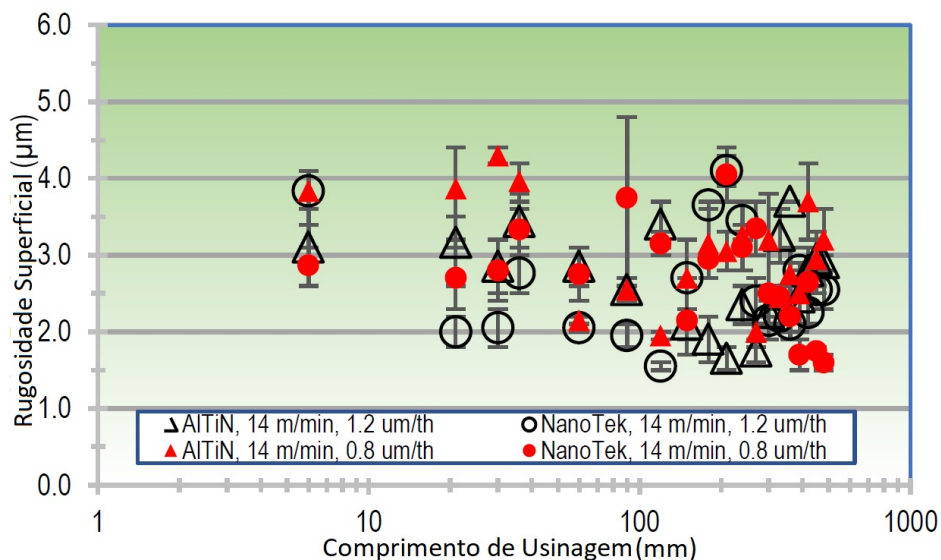


Figura 4.16: Variação da rugosidade superficial em relação ao comprimento de usinagem ao utilizar o método MQL a uma velocidade de corte de 14 m/min (Sadiq et al. (2018)).

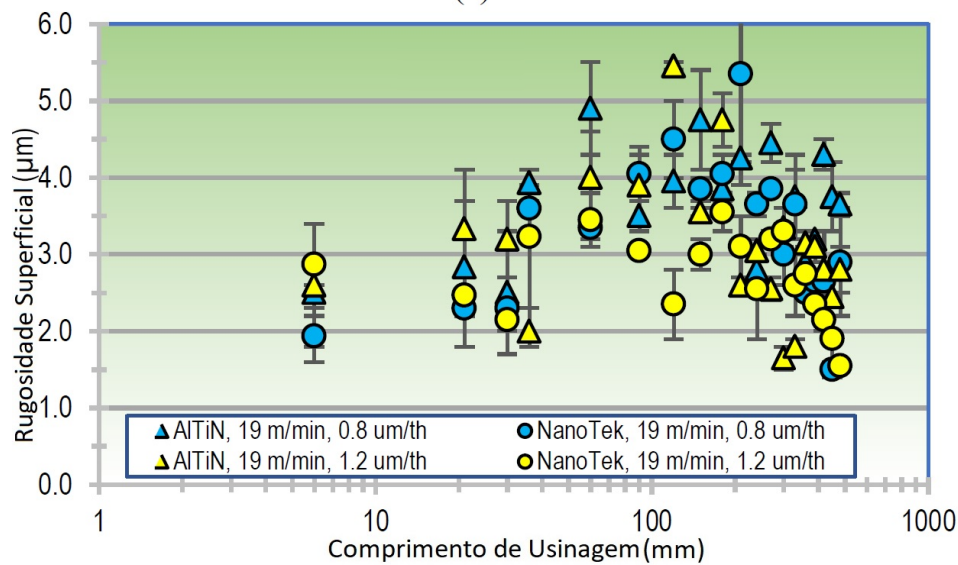


Figura 4.17: Variação da rugosidade superficial em relação ao comprimento de usinagem ao utilizar o método MQL a uma velocidade de corte de 19 m/min (Sadiq et al. (2018)).

Kuram e Ozcelik (2015) foram idealizadores de um estudo visando a otimização dos parâmetros utilizados no processo de microfresamento em materiais aeroespaciais através do método Taguchi. Tal metodologia usa especialmente uma matriz experimental conhecida como matriz ortogonal objetivando o encontro dos melhores níveis de parâmetros de entrada dentro dos intervalos levados em consideração.

Durante o experimento, um dos materiais analisados foi o Inconel 718 com dureza de 43 HRC. A ferramenta utilizada possui diâmetro de  $800 \mu\text{m}$  e raio de aresta de  $3 \mu\text{m}$ . Todos os experimentos foram microfresados a seco, com comprimento de  $3000 \text{ mm}$  e largura de corte constante de  $100 \mu\text{m}$ . As variações dos parâmetros de corte podem ser observados nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2. Desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e forças de corte foram as respostas de saída consideradas na análise (KURAM; OZCELIK, 2015).

Tabela 4.1: Controle de parâmetros e seus níveis (Kuram e Ozcelik (2015)).

Código	Parâmetros de Controle	Unidade	Nível 1	Nível 2	Nível 3
A	Velocidade de rotação	r/min	10000	11000	12000
B	Velocidade de avanço	mm/min	50	75	100
C	Profundidade de corte	$\mu\text{m}$	50	75	100

Tabela 4.2: Matriz ortogonal  $L_9$  ( $3^3$ ) de Taguchi (Kuram e Ozcelik (2015)).

Número do experimento	Velocidade de rotação	Velocidade de avanço	Profundidade de corte
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Como resultado, os autores relatam um desgaste de ferramenta predominante na aresta de corte, como observa-se na Figura 4.18. Os mesmos complementam mencionando uma formação de rebarbas na ferramenta justificada pela alta reatividade com o material combinada com impacto e concentração de estresse (KURAM; OZCELIK, 2015).

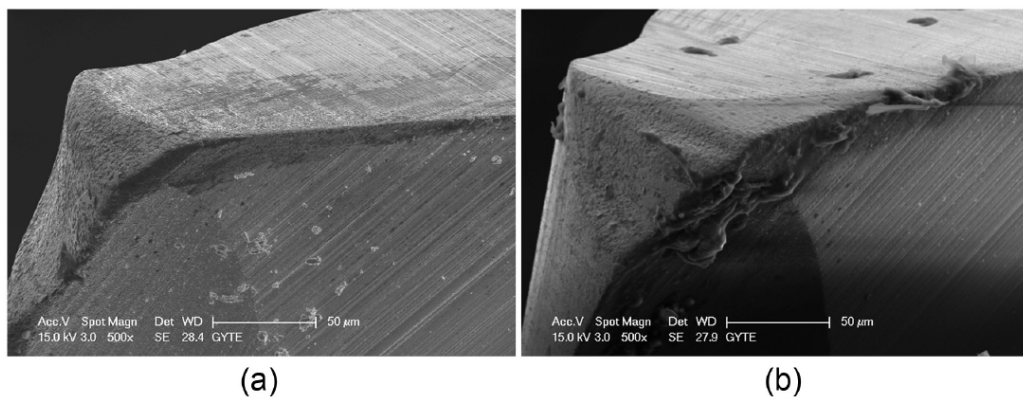


Figura 4.18: Desgaste de ferramenta resultante do microfresamento de Inconel 718: (a) Experimento 2 - Velocidade de rotação de 10000 r/min, velocidade de avanço de 75 mm/min e profundidade de corte de 75  $\mu\text{m}$  e (b) Experimento 8 - Velocidade de rotação de 12000 r/min, velocidade de avanço de 75 mm/min e profundidade de corte de 50  $\mu\text{m}$  (Kuram e Ozcelik (2015)).

Em relação aos resultados obtidos referentes a textura superficial resultante do processo de microfresamento, Kuram e Ozcelik (2015) afirmam a presença de rastros de corte da ferramenta entre as passadas e o não acúmulo de material derivado de deformação plástica. Ambas situações estão evidenciadas na Figura 4.19. Os autores acrescentam que ao selecionar as faixas de velocidade de rotação e velocidade de avanço menor que o valor mínimo aumenta o tempo de usinagem; no entanto, selecionando-os acima do valor máximo aumenta o desgaste da ferramenta, força de corte e risco de corte quebra da ferramenta.



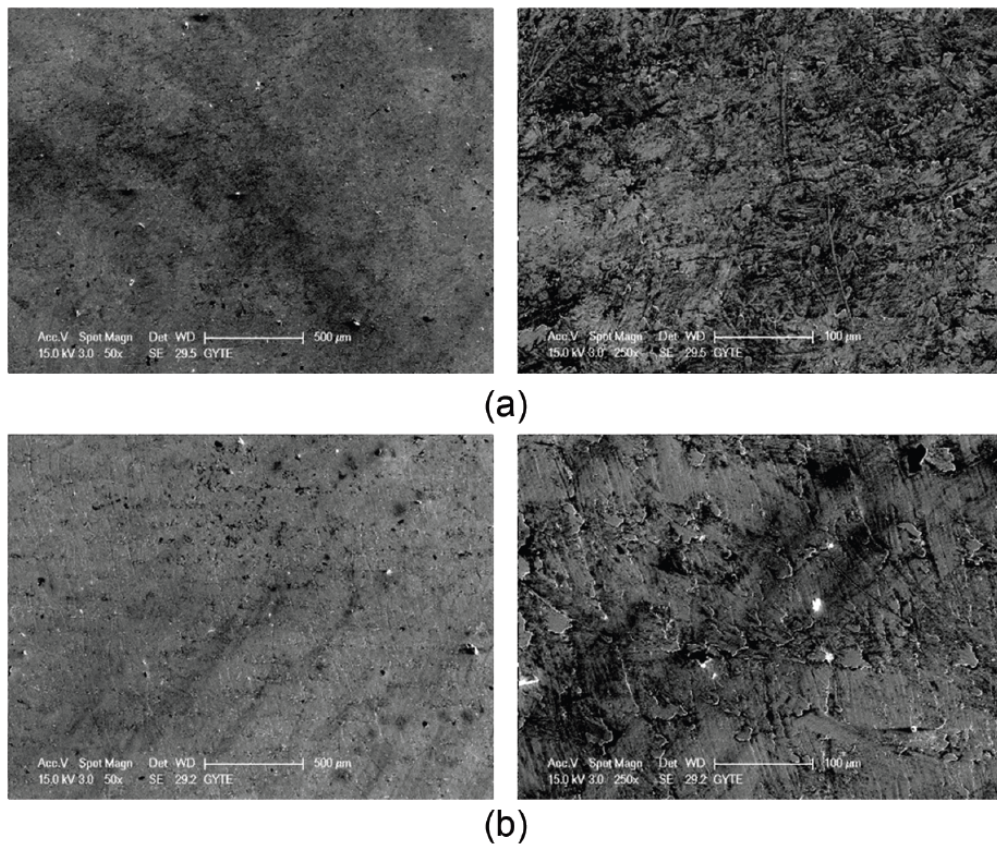


Figura 4.19: Textura superficial resultante do microfresamento de Inconel 718: (a) Experimento 2 - Velocidade de rotação de 10000 r/min, velocidade de avanço de 75 mm/min e profundidade de corte de 75  $\mu\text{m}$  e (b) Experimento 8 - Velocidade de rotação de 12000 r/min, velocidade de avanço de 75 mm/min e profundidade de corte de 50  $\mu\text{m}$  (Kuram e Ozcelik (2015)).

Como resultado dos experimentos, Kuram e Ozcelik (2015) listam os resultados encontrados referente a desgaste de ferramenta e rugosidade superficial para cada um dos ensaios. A Tabela 4.3 exhibe detalhadamente tal situação.

Tabela 4.3: Desgaste de ferramenta e rugosidade superficial resultantes do microfresamento de Inconel 718 (Kuram e Ozcelik (2015)).

Número do experimento	Desgaste de ferramenta ( $\mu\text{m}$ )	Rugosidade superficial ( $\mu\text{m}$ )
1	19,46	0,04
2	22,65	0,12
3	30,27	0,18
4	21,42	0,08
5	29,01	0,017
6	32,54	0,12
7	29,73	0,16
8	37,48	0,18
9	45,87	0,25

## 4.2 Avaliação das condições de usinagem e parâmetros de corte de estudos de microfresamento de Inconel 718

De toda a base de dados levantada para a execução deste projeto, torna-se imprescindível a ponderação de que apenas estudos publicados até o mês de Novembro de 2021 foram considerados para tal análise. Ademais, acrescenta-se que uma gama de outros estudos aqui não citados também foram considerados, porém não atenderam a demanda de informação desejada. Dessa forma, apenas um total de 8 estudos, que supriram tal exigência, foram selecionados neste projeto de graduação.

Ao levar em consideração esses 8 estudos de diferentes autores, tornou-se possível realizar uma análise de comparação com os resultados encontrados por cada um. No total foram ponderadas um total de 120 amostras nos quais suas informações estão listadas e detalhadas na Figura A.1 (Anexo), servindo de base para todo estudo de paridade desenvolvido neste trabalho.

Utilizou-se a elaboração de gráficos para tornar as comparações mais evidentes diante de suas respectivas propostas.

As análises iniciais voltaram-se para comparações estatísticas. O objetivo das mesmas é de quantificar os parâmetros de corte e características mais utilizadas no meio do microfresamento. Com isso, posteriormente, proceder com as considerações dos resultados encontrados.

### 4.2.1 Análise de frequência das características e parâmetros de corte adotados

Dentro os estudos levados em consideração, o diâmetro de corte foi informado em 100% dos casos. Observando a Figura 4.20, nota-se que os valores de 760 e 768 se destacam como os mais utilizados. Entretanto, ambos reproduzem apenas 2 estudos cada. De forma que, apenas Uzun, Aslantas e Bedir (2013) realizaram 24 experimentos utilizando microfresas de 760  $\mu\text{m}$  de diâmetro e Uzun, Aslantas e Bedir (2015), 48 com microfresas de 768  $\mu\text{m}$ . Ou seja, não é possível afirmar que exista uma predominância referente ao uso de ferramentas com um determinado diâmetro dentro do meio do microfresamento.

Na Figura 4.20 também observa-se uma variação considerável de diâmetros de ferramenta. Microfresas de 381  $\mu\text{m}$  utilizadas por dos Santos et al. (2021) até de 1000  $\mu\text{m}$  optadas por Kiswanto, Azmi e Ko (2019) evidenciam tamanha variedade de ferramentas utilizadas. Ademais, nota-se que não existe recorrência na seleção de ferramentas por parte dos autores, isto é, nenhum autor optou por ferramentas com o mesmo diâmetro do outro.

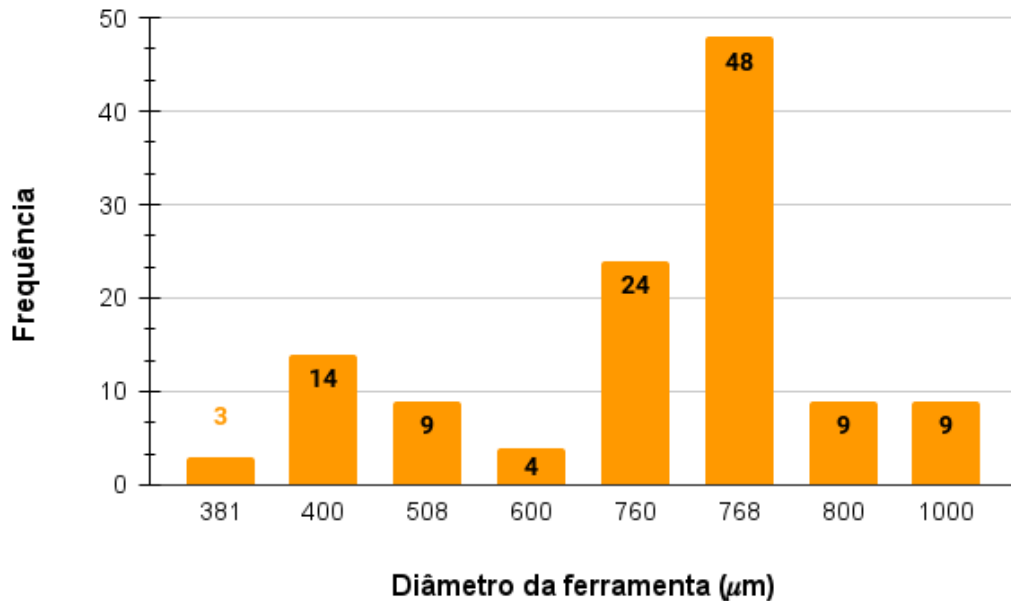


Figura 4.20: Frequência do diâmetro das ferramentas utilizadas nos estudos.

O raio de aresta de corte é um parâmetro de considerável significância na atividade de microusinagem. Tal situação destaca-se na Subsubseção 2.2.1.2 sobre efeito escala.

Das 120 amostras consideradas, apenas 9 não informaram o raio de aresta de corte das ferramentas antes do processo de usinagem. Tais valores estão descritos na Figura 4.21 como NI (Não Informado). Observa-se também a predominância de raios de aresta com o valor de  $2 \mu\text{m}$  na mesma figura, porém não é possível garantir que essa superioridade seja verídica, uma vez que apenas 2 artigos ((UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2013) e (UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2015)) adotaram ferramentas com esse valor de raio de aresta de corte.

Outro valor que também teve um destaque foi o de  $3 \mu\text{m}$  com um total de 21 amostragens, mas da mesma forma, não é possível tirar nenhum tipo de conclusão. Apenas 2 estudos ((UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2015) e (KURAM; OZCELIK, 2015)) utilizaram ferramentas com esse valor de raio de aresta. Dessa forma, entende-se que não exista um real destaque para tal característica de ferramenta.

De forma geral, na Figura 4.21 nota-se uma tendência a variação dos que foram considerados. Visto que, nenhum mesmo valor de raio de aresta de corte esteve presente em mais de 2 trabalhos.

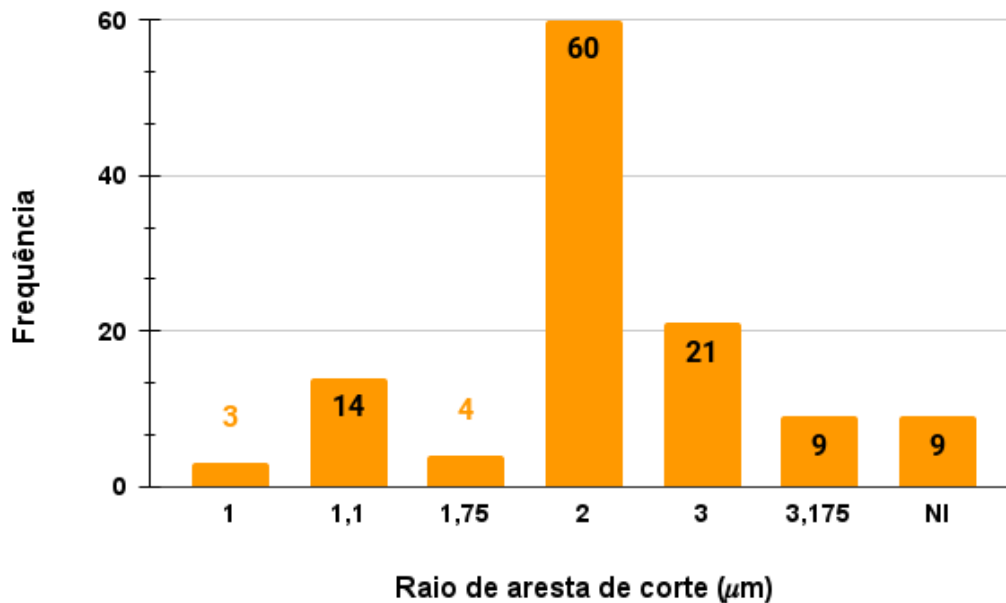


Figura 4.21: Frequência dos raios de aresta de corte .

O revestimento é um fator importante que afeta o desempenho da ferramenta de corte. Em particular, afeta diretamente a superfície qualidade e formação de rebarbas no processo de microfresamento. Posteriormente ao processo de usinagem, a qualidade da superfície é muito difícil de aumentar em um segundo processo, tornando relevante a obtenção de superfícies que já tenham boas características. Além disso, na microusinagem, a ferramenta de corte necessita de uma boa resistência ao desgaste, devido ao fato de que a processo de corte é realizado em alta velocidade (UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2015).

Levando em consideração os 120 casos considerados, no quesito revestimento, apenas 7,5% das amostras não informaram o tipo de revestimento de suas ferramentas de corte. Essa omissão de informação é referente apenas a 1 artigo com 9 experimentos e seus valores estão representados na Figura 4.22 como NI (Não Informado).

Observando a mesma figura, percebe-se um destaque nas ferramentas com revestimento AlTiN, utilizada em 4 dos 8 estudos considerados. Seguido por DLC e AlCrN, disposto em 2 e 1 artigos respectivamente. E em contrapartida, apesar de uma amostragem inferior, ferramentas sem revestimento também foram aplicadas em 2 trabalhos diferentes. Dessa forma, torna-se cabível a conclusão de que ferramentas com revestimento de AlTiN vem sendo as mais utilizadas no meio.

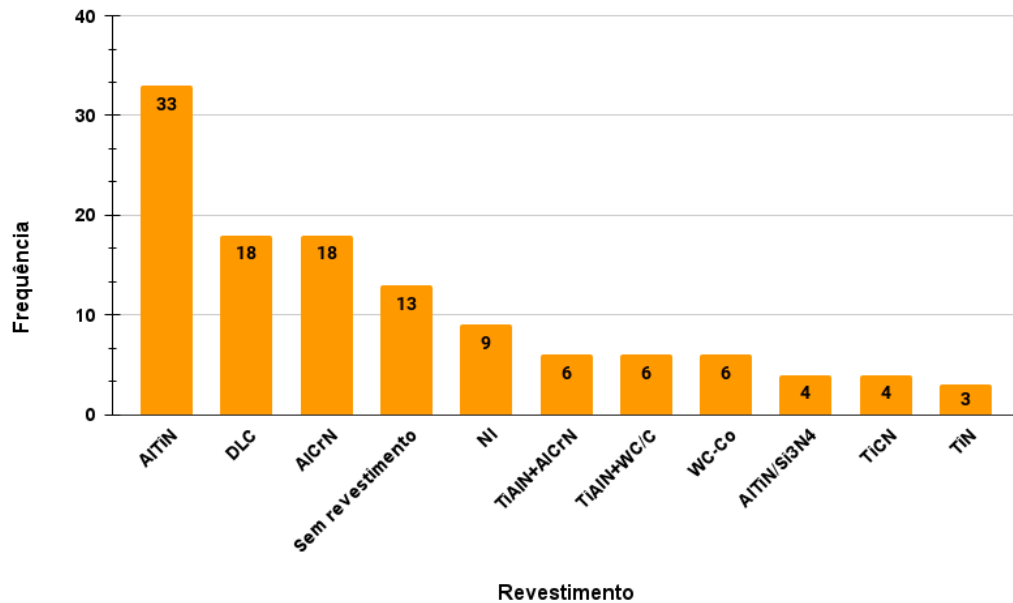


Figura 4.22: Frequência de revestimentos vigentes nas microfresas utilizadas.

A velocidade de corte, parâmetro considerado na Figura 4.23 exibe a variação de tal parâmetro e sua frequência das amostras consideradas na Figura A.1. Apesar do considerável destaque das velocidades 47,75 e 48, ambas foram empregadas apenas nos estudos de (UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2015) e (UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2013) respectivamente. Ou seja, tal destaque dá-se apenas pelo fato dos autores terem conduzido uma quantidade superior de amostras em suas análises.

Ressalta-se que métodos estatísticos têm sido usados para construir modelos para previsão de condições de corte em microfresamento, como desgaste da ferramenta, forças de corte e rugosidade da superfície. Saedon et al. (2012) foram responsáveis por análises estatísticas para entender o efeito de velocidade de corte, na vida útil da ferramenta em microfresamento de aço AISI D2 a seco usando microfresas de 0,5 mm de diâmetro e revestidas com TiAlN. O estudo foi embasado em termos de valores médios e níveis de confiança diante dos resultados encontrados pós microfresamento. A adequação do modelo preditivo foi verificada por meio de análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% e considerado adequado. A faixa de velocidade de corte levada em consideração foi de 14,77 até 68,30 m/min. Nesse estudo, após a adequação dos modelos, os autores relatam que a equação de vida da ferramenta estabelecida no trabalho apresenta a velocidade de corte como o principal fator impactante na vida útil da ferramenta.

Além disso, observando ainda a Figura 4.23, nota-se uma considerável variação dos valores de velocidade. Tais velocidades variam de 9,43 m/min a 75 m/min com uma frequência equilibrada. Fator que realça a não padronização e consenso desse parâmetro no meio do microfresamento de Inconel 718.

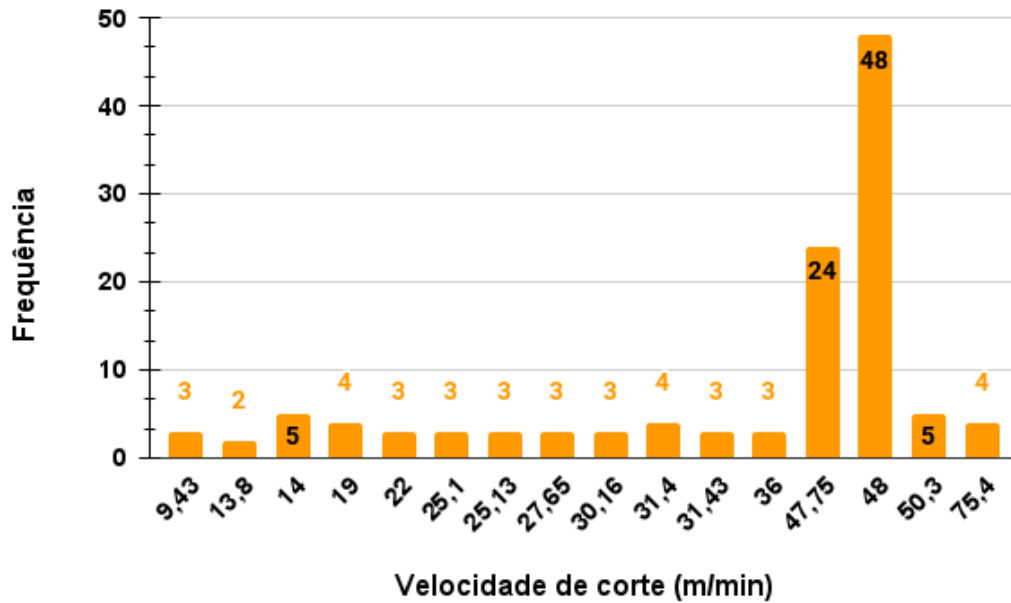


Figura 4.23: Recorrência de cada Velocidade de corte determinada pelos autores do estudos analisados.

Kiswanto, Zariatn e Ko (2014) foram idealizadores de um trabalho estatístico levando em conta a rugosidade superficial e formação de rebarba diante processos de microfresamento de ligas de alumínio AA1100 com ferramentas de 0,2 mm de diâmetro. Nesse trabalho, os autores promoveram uma análise levando em conta questões de produtividade, ou seja, variações de parâmetros de corte que propiciariam um menor tempo de usinagem e um menor desgaste de ferramenta diante de dados qualitativos. Ainda nesse estudo, dentro dos valores de avanço propostos, é possível concluir que avanços maiores podem gerar usinagens qualitativamente melhores, com menor tempo de usinagem e menor desgaste de ferramenta.

Dentro das 120 amostras analisadas, todas tiveram seus respectivos avanços informados, como observa-se na Figura 4.24. Também nota-se um intervalo considerável entre o menor valor (0,1  $\mu\text{m}/\text{aresta}$ ) e o maior (20  $\mu\text{m}/\text{aresta}$ ). Porém, dentro dos valores que ainda se destacaram, observa-se uma diferença considerável entre eles, tais valores são o 1,25, 2,50, 3,75 e 5,00  $\mu\text{m}/\text{aresta}$ . E ao perceber que 5,00  $\mu\text{m}/\text{aresta}$  é um valor 4 vezes maior que 1,25  $\mu\text{m}/\text{aresta}$ , assenta-se da grandeza dessa variação. Sendo assim, não pode-se afirmar que existe uma faixa de tendência, levando em consideração puramente a recorrência, dos avanços adotados pelos autores dos 8 trabalhos considerados.

Analisando os 4 valores em destaque, reconhece-se a proeminência da recorrência do avanço de 5,00  $\mu\text{m}/\text{aresta}$  nos estudos considerados ainda na Figura 4.24. Também vale destacar que tal valor está presente em 50% dos trabalhos aqui ponderados. Em contrapartida, os valores de 3,75 e 1,25  $\mu\text{m}/\text{aresta}$  estão presentes em apenas 25%, já o de 2,50  $\mu\text{m}/\text{aresta}$  em 37,5%. Outra observação relevante é a que todos os 4 avanços destacados fazem parte de 100% dos parâmetros de corte estabelecidos pelos 2 estudos com a maior amostragem, que são Uzun, Aslantas e Bedir (2013) e Uzun, Aslantas e Bedir (2015). Ainda assim, desconsiderando esses

2 estudos, é possível notar que o valor de  $5,00 \mu\text{m}/\text{aresta}$  ainda se sobressai diante os outros, estando presente em 12 ensaios sob essa condição. Dessa forma, pode-se concluir que tanto no quesito de recorrência quanto no de popularidade, o valor de  $5,00 \mu\text{m}/\text{aresta}$  é referência no âmbito do microfresamento de Inconel 718.

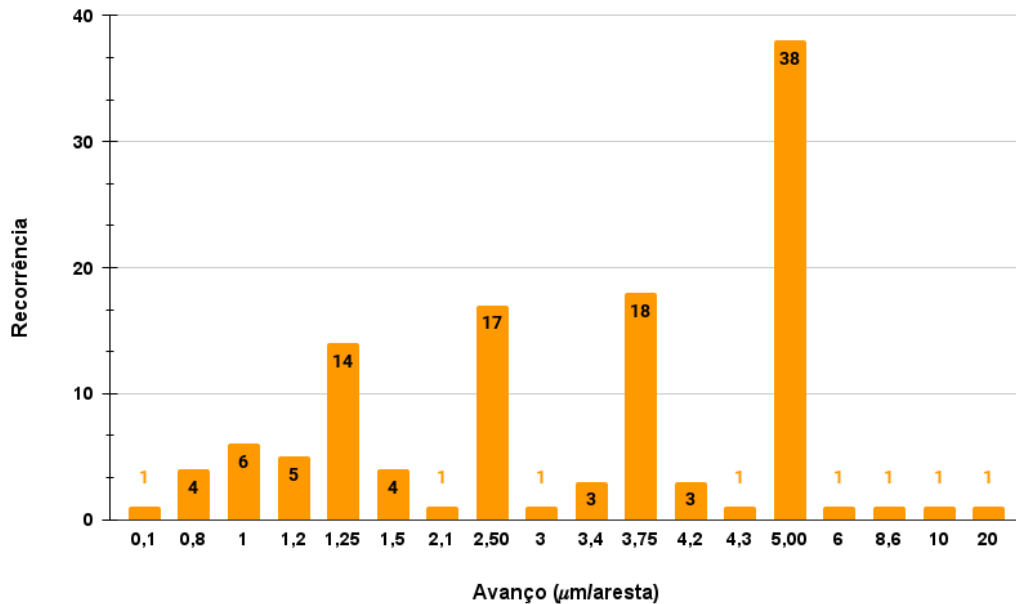


Figura 4.24: Recorrência dos avanços definidos nos ensaios considerados.

A profundidade de corte, ou espessura de corte, da mesma forma, é um parâmetro de corte significativa relevância na atividade de microfresamento. Como detalhado na Subsubseção 2.2.1.3. Levando em consideração a Figura 4.25, que contém a recorrência da profundidade de corte selecionada pelos autores, observa-se uma considerável faixa de variação, uma vez que os valores variam de 0,01 a 0,2 mm. Sendo que, cerca de 65,8% de todo campo amostral está entre 0,1 e 0,2 mm e outros 29% entre 0,01 e 0,04 mm. Ou seja, percebe-se que existem 2 zonas em destaque dentro do gráfico.

Ainda na Figura 4.25, nota-se que apenas o valor de 0,1 mm representa cerca de 34% de todo o campo amostral e também está presente em 50% dos estudos ponderados. Já os outros 3 maiores valores (0,15, 0,2 e 0,02 mm) situam-se em apenas 2, enquanto 0,01 e 0,04 mm em apenas 1 estudo. É válido também discorrer que parte do destaque evidenciado nos valores 0,1, 0,15 e 0,2 mm remete-se ao fato de todos também fazerem parte de 100% das profundidades de corte optadas nos estudos de Uzun, Aslantas e Bedir (2013) e Uzun, Aslantas e Bedir (2015), que contém as maiores faixas amostrais. Entretanto, mesmo desconsiderando esses dois trabalhos, o valor de 0,1 mm ainda destaca-se como sendo um dos mais adotado entre os autores, com uma recorrência de 12, mesmo sob tal condição. Dessa forma, conclui-se que apenas o valor de 0,1 mm de profundidade de corte destaca-se na atividade de microfresamento de Inconel 718.

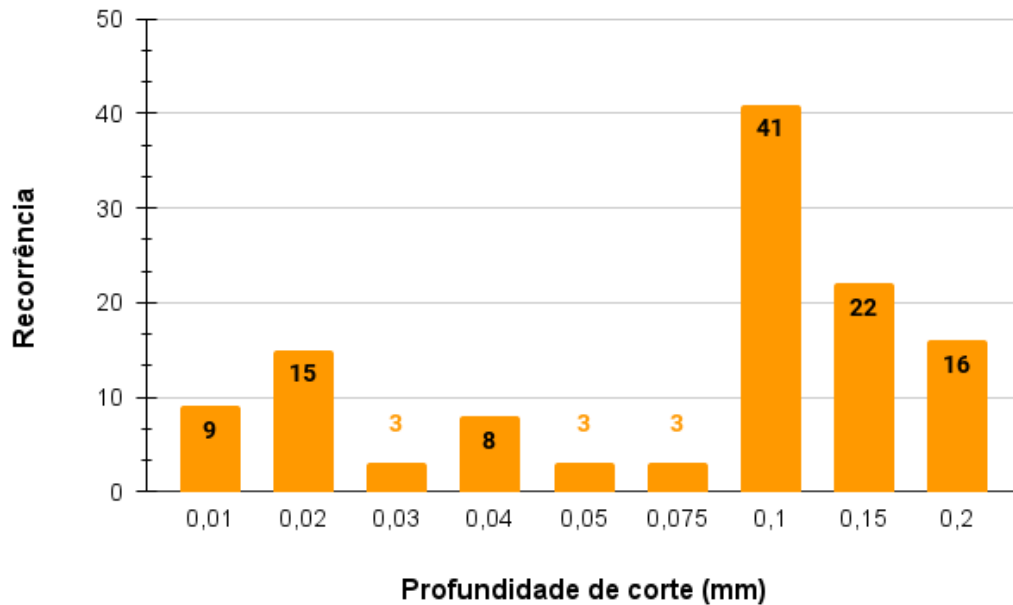


Figura 4.25: Recorrência dos valores definidos como profundidade de corte diante dos estudos analisados.

Sobre os comprimentos de usinagem considerados na Figura A.1, apenas um estudo não teve o comprimento de usinagem de seus canais divulgado, resultando no total de 3 amostras com esse parâmetro não informado. A Figura 4.26 ilustra a distribuição de tal parâmetro de corte em relação a sua frequência contabilizada entre as amostras.

Ainda na Figura 4.26, observa-se que 60% das amostras foram de microfresamentos com 120 mm de comprimento. Entretanto, não pode-se inferir qualquer informação diante tal realce, uma vez que apenas 2 trabalhos adotaram tal parâmetro ((UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2013) e (UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2015)). Ademais, apenas o valor de 15 mm comprimento de usinagem também foi selecionado em 2 estudos, os demais comprimentos de usinagem estiveram presentes em somente 1 artigo cada. Dessa forma, conclui-se que não há qualquer tipo de tendência ou destaque no que se refere a comprimento de usinagem na atividade de microfresamento de Inconel 718.

Este é um fator que se destaca, uma vez que a formação de rebarbas é significativamente afetada pela condição da ferramenta, que se degrada durante o comprimento usinado. Este conhecimento da seleção apropriada dos parâmetros de corte e da condição real da ferramenta seria uma consideração importante ao planejar um processo de microfresamento para produzir um produto com o mínimo de rebarbas. No entanto, quando o tempo de usinagem é transformado em comprimento total de corte, sabe-se que um maior avanço, conseqüentemente confere uma usinagem mais produtiva por produzir maior comprimento de corte (KISWANTO; ZARIATIN; KO, 2014). Nesse estudo, os autores ponderaram a formação de rebarba e rugosidade superficial diante do comprimento de usinagem em processos de microfresamento da liga de alumínio AA1100 com microfresas de 0,2 mm de diâmetro. Tal relevância foi mensurada através do método estatístico ANOVA ao variar os parâmetros de corte. Por tal método, verifica-se



que o comprimento usinado contribui significativamente na rugosidade superficial e rebarba formada. Kiswanto, Zariatin e Ko (2014) concluem que, em termos de qualidade, o comprimento de usinagem é o fator mais influente na formação de rebarba.

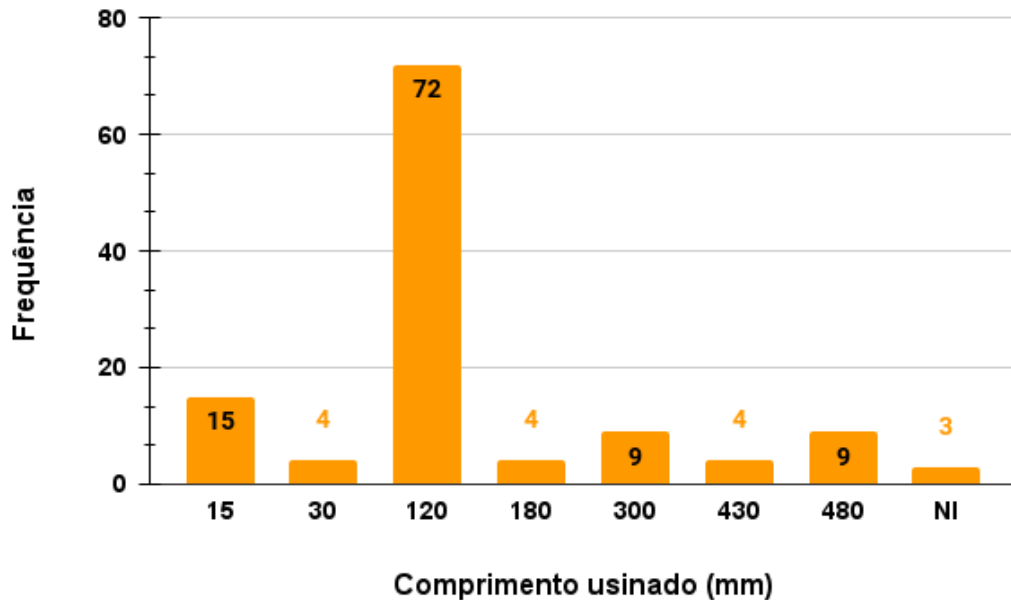


Figura 4.26: Frequência do comprimento de usinagem dos ensaios considerados.

A lubrificação ou ausência da mesma também é um fator determinante no quesito de qualidade em um processo de microusinagem de Inconel 718, conforme apresentado na Subseção 2.2.2. A Figura 4.27 apresenta a condição de lubrificação e método de aplicação de todos as 120 amostras consideradas na Figura A.1. Dentro desse gráfico, observa-se um destaque considerável nos processos de microfresamento a seco, que representam cerca de 76,6% do meio. Fator curioso, uma vez que espera-se que experimentos com aditivo de lubrificantes resultem em melhores resultados de rugosidade superficial, formação de rebarba e desgaste de ferramenta. De toda forma, 7 dos 8 estudos ponderados realizaram atividades de microfresamento de Inconel 718 com ausência de fluido lubrificante.

Por outro lado, experimentos com auxílio de lubrificantes também estiveram presentes em uma considerável quantidade de trabalhos, em um total de 5 dos 8 avaliados. Porém, mesmo ciente de seus benefícios, ainda observa-se uma maior popularidade na usinagem a seco em comparação as com uso de lubrificantes. Condição evidenciada tanto na Figura A.1 quanto na Figura 4.27.

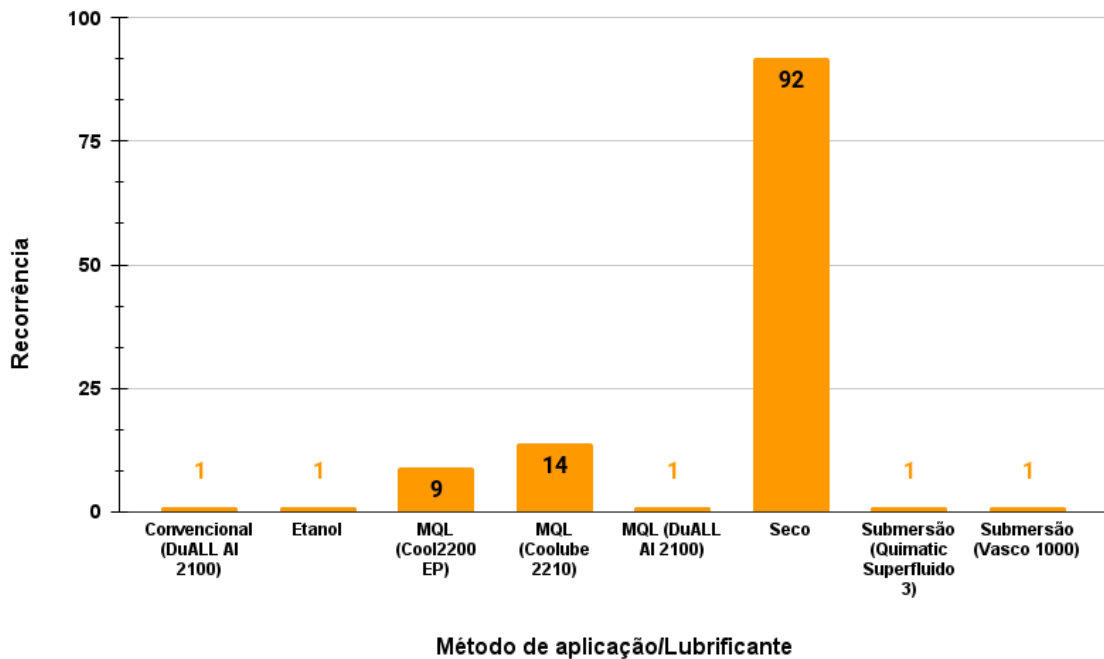


Figura 4.27: Recorrência dos lubrificantes e respectivo métodos de aplicação utilizado na amostragem analisada.

#### 4.2.2 Análise qualitativa dos experimentos diante os parâmetros de corte

Ainda ponderando a Figura A.1, porém com critérios qualitativos diante dos resultados nos experimentos listados, procedeu-se com a Figura 4.28 que ilustra a redução do diâmetro de ferramenta, em percentual, diante das condições e parâmetros de corte providos em cada experimento sob uso de lubrificantes. No total dos 8 estudos considerados, 5 informaram os resultados pertinentes ao desgaste das ferramentas utilizadas. Assim, combinado com o fato de somente projetar na Figura 4.28 experimentos contendo todas as informações de ferramental, lubrificação e parâmetros de corte, 17 ensaios foram incididos no gráfico.

Investigando o trajeto desses 17 ensaios na mesma figura, é possível notar o destaque de 3 ensaios diante do restante na coluna de redução do diâmetro de ferramenta. Esses 3 ensaios foram idealizados por Aslantas e Çiçek (2018) e apresentaram resultados significativamente superiores em comparação com os demais. O terceiro maior resultado, que apresentou redução de 24,16% do diâmetro, é cerca de 5 vezes maior que o quarto, que apresentou desgaste de 4,75%, por exemplo. Em paralelo, observa-se que os mesmo 3 experimentos contêm comprimentos de usinagem expressivamente superiores também, enquanto o restante das configurações ferramentais e parâmetros de corte não se destacam. Dessa forma, é possível concluir que o comprimento de usinagem é um agente relevante no quesito desgaste de ferramentas em processos de microfresamento de Inconel 718, conforme esperado pela literatura de usinagem macro.



Figura 4.28: Redução do diâmetro de ferramenta diante seus respectivos parâmetros de corte com uso de lubrificantes.

A formação de rebarba, tópico já abordado na Subsubseção 2.2.3.2, na presente avaliação foi desmembrada em sentido concordante e discordante, como observa-se na Figura 4.29 e Figura 4.30. Ambas figuras englobam apenas experimentos da Figura A.1 que contêm descritas



uma quantidade superior de amostras, um total de 12. Tais amostras estão presentes nos estudos de De Oliveira (2019) e Aslantas e Çiçek (2018) e também apresentam variação no método de lubrificação. Na Figura 4.30 evidencia-se algumas situações passíveis de conclusão, nos quais a primeira é a relevância do fluido de corte. Observa-se que atividades de microfresamento realizados com etanol e a seco foram as que apresentaram maior formação de rebarba mesmo possuindo as mesmas características ferramentais e parâmetros de corte de outros experimentos. A atividade a seco, segunda maior formadora de rebarba, manifestou valor 30% superior a terceira onde adotou-se o método de lubrificação convencional (fluido: DuALL Al2100). A segunda percepção passível de conclusão é a da influência do comprimento de usinagem na formação de rebarba, uma vez que os experimentos de Aslantas e Çiçek (2018), com 430 mm de usinagem apresentaram superioridade nos valores de formação rebarba. A terceira interpretação susceptível a conclusão é importância do avanço na formação de rebarba, visto que valores muito baixos podem propiciar a ocorrência do fenômeno *ploughing*, que conseqüentemente incrementa a formação de rebarba. Finalmente, a quarta concepção da-se diante do elevado valor de raio de ferramenta utilizado nos experimentos que resultaram na elevada formação de rebarba, já que tal característica também promove o fenômeno *ploughing*.

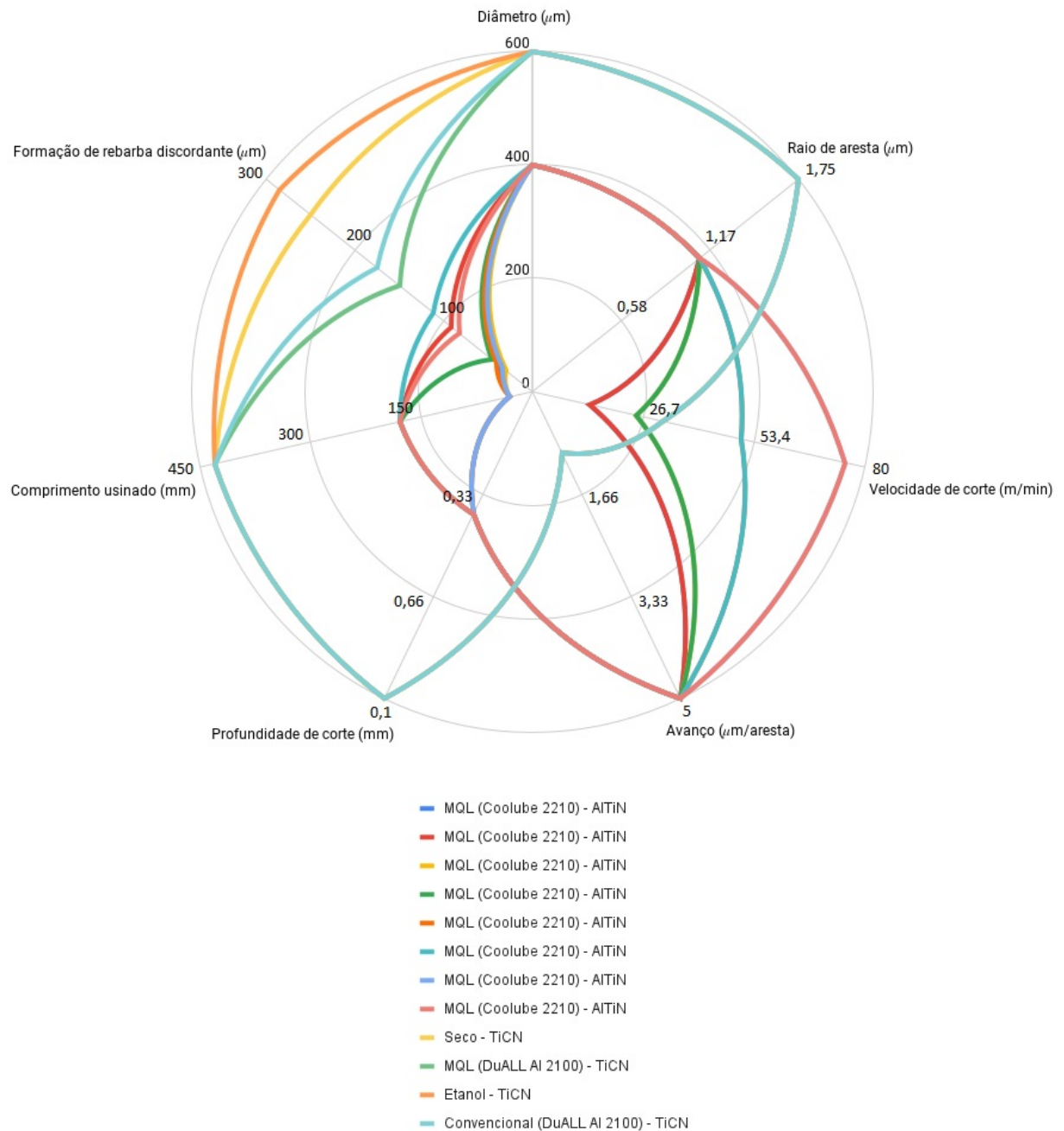


Figura 4.30: Formação de rebarba no sentido discordante de usinagem diante seus respectivos parâmetros de corte.

A rugosidade superficial, assunto estendido na Subsubseção 2.2.3.1 também foi levada em consideração diante dos valores fornecidos na Figura A.1. Perante a grande quantidade de valores, dividiu-se a análise dos experimentos sob método de lubrificação MQL, apresentada na Figura 4.31, e a seco, ilustrada na Figura 4.32. Em ambas figuras, foram ponderadas somente experimentos que informam todos as configurações de ferramenta, método de lubrificação e parâmetros de corte.

A Figura 4.31 foi alimentada somente com dados de 3 experimentos, De Oliveira (2019), Aslantas e Çiçek (2018) e Sadiq et al. (2018). Todos efetivaram experimentos sob condições

de corte e configuração de ferramenta significativamente distintos, porém o único que se destacou foi o de Aslantas e Çiçek (2018). Infere-se que a combinação de alguns fatores podem ter motivado tal destaque, sendo o primeiro deles o raio de aresta de ferramenta, de  $3,18 \mu\text{m}$ , combinado com uma profundidade de corte consideravelmente pequena, de  $0,02 \text{ mm}$ . A conjugação de ambas condições propicia a concepção do efeito *ploughing*, resultando então, em uma rugosidade superficial elevada. Episódio que atesta a teoria proposta e atesta a demanda por ferramentas afiadas e profundidades de corte grandes o suficiente para deformar o Inconel 718 usinado plasticamente.

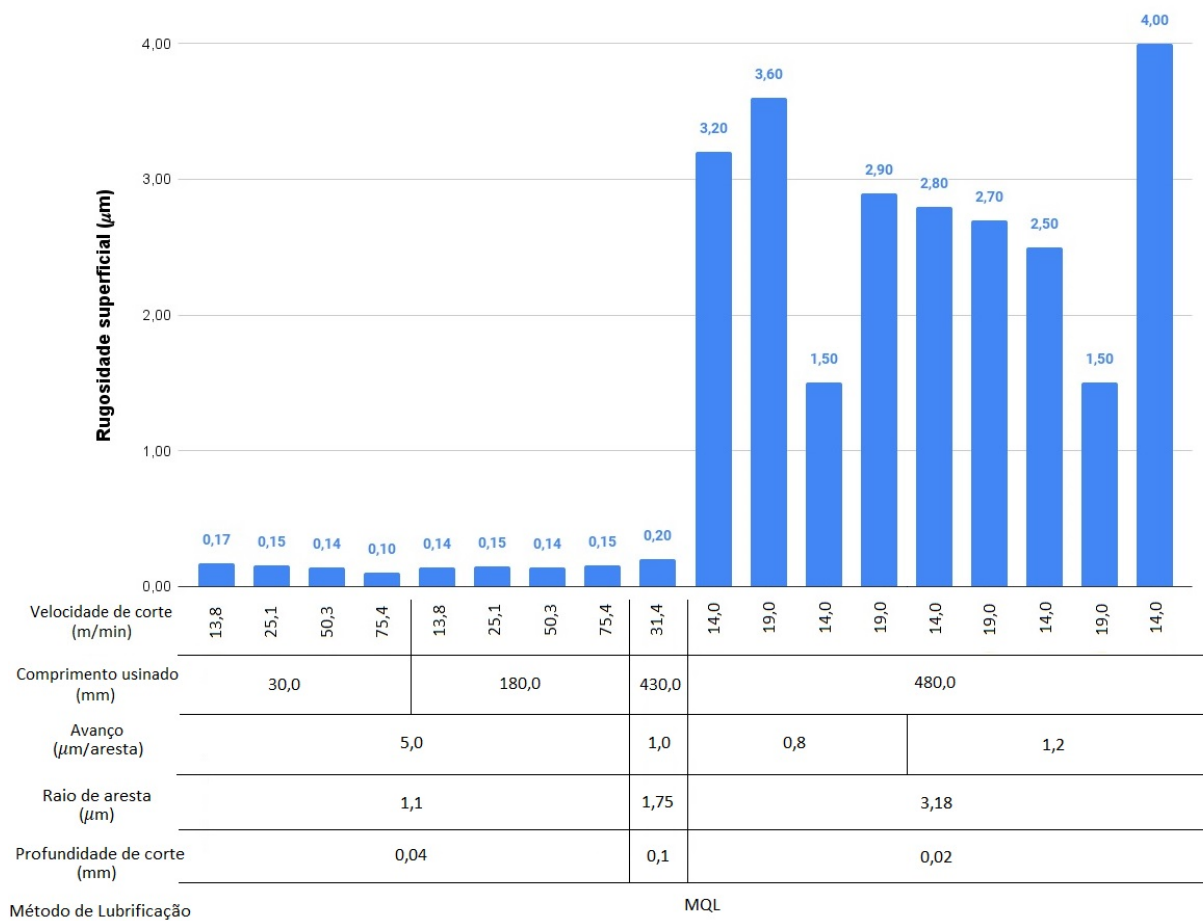


Figura 4.31: Rugosidade superficial produzida diante microfresamento sob método de lubrificação MQL.

Proveu-se os dados da Figura 4.32 com 3 estudos diferentes, de Uzun, Aslantas e Bedir (2015), Aslantas e Çiçek (2018) e Kuram e Ozelik (2015). Observa-se que nenhum dos 18 experimentos salienta-se diante do presente cenário, além de valores de rugosidade superficial sob condições de diferentes ferramentas e parâmetros de corte convergindo seus resultados. Acredita-se que, diante a ausência de fluido lubrificante, a imprevisibilidade dos resultados é eminente. Dessa forma, torna-se inviável a tomada de qualquer conclusão diante da conjuntura reproduzida.

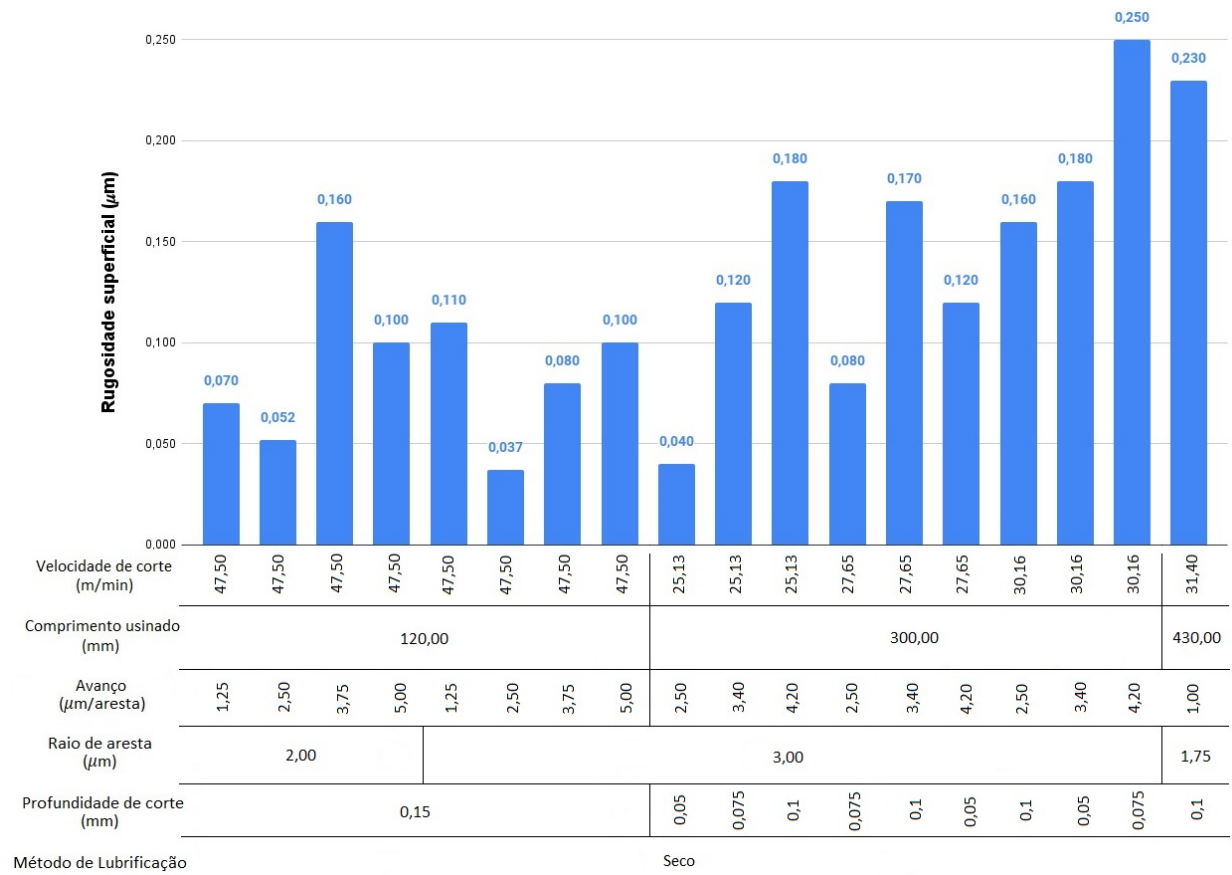


Figura 4.32: Rugosidade superficial diante microfresamento a seco.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO

Através da coleta e análise de dados sobre microfresamento de Inconel 718 presentes neste trabalho, foi possível alcançar as seguintes conclusões:

- A microusinagem se mostra uma forma de fabricação de relevância no cenário atual. Porém, existem diferenças na forma como o material é removido na microusinagem, quando comparada à usinagem convencional.
- Dentre as diferenças à usinagem macro, destacam-se: a estrutura do material que tem dimensões próximas às da microfresa e o efeito escala, que faz com que as energias específicas de corte aumentem exponencialmente.
- O Inconel 718 é uma liga com grande aplicação industrial porém de reconhecida baixa usinabilidade. Esta liga apresenta propriedades que dificultam o seu microfresamento. Estas podem ser sumarizadas como: dificuldade na geração de cavacos e grande desgaste das microfresas.
- Não existe uma predominância referente ao uso de ferramentas em função do diâmetro e do raio de aresta de corte e nem em termos de velocidade de corte e comprimento usinado.
- Percebe-se que ferramentas revestidas com AlTiN destacam-se no quesito recorrência diante sua presença em uma quantidade significativa de estudos. Também recomenda-se seu uso devido a conservação provida à ferramenta durante a atividade de microfresamento de Inconel 718.
- O valor de avanço de  $5,00 \mu\text{m}/\text{aresta}$  destaca-se tanto no quesito de recorrência quanto no qualidade no âmbito de microfresamento de Inconel 718 e pode ser recomendado seu uso.
- Observa-se proeminência para profundidades de corte com valor de  $0,1 \text{ mm}$  em questões de recorrência e popularidade no meio de microfresamento de Inconel 718. Ademais, recomenda-se seu uso diante os resultados proferidos.
- Evidencia-se que mesmo ciente dos benefícios do processo de microfresamento de Inconel 718 sob o uso de lubrificantes, o processo a seco ainda é mais utilizado no ramo.

- Afere-se a relevância do comprimento de usinagem diante do desgaste de ferramenta e formação de rebarba. De forma que, observa-se que comprimentos de usinagem elevados proporcionarão, como consequência, desgastes de ferramenta excessivos.
- Depreende-se que ensaios de elevados comprimentos de usinagem resultam em uma maior formação de rebarba no sentido concordante de usinagem para o microfresamento de Inconel 718.
- A presença ou ausência do fluido de corte, assim como a composição de tal substância apresenta-se como significante em frente a formação de rebarba no processo de microfresamento de Inconel 718. Uma vez que fluidos que agem como redutores de atrito entre a ferramenta e o material apresentam menor formação de rebarba. Não recomenda-se o uso de Etanol como fluido lubrificante para realização de tal atividade.
- Atesta-se a concepção do efeito *ploughing* diante uma combinação de condições. Valores considerados pequenos para profundidade de corte e avanço somados a um raio de aresta de ferramenta avantajado propiciam tal fenômeno na atividade de microfresamento de Inconel 718.

## 5.1 Recomendações de parâmetros

Diante a concepção do cenário de microfresamento de Inconel 718 levantado, tornou-se possível a recomendação de parâmetros para execução do mesmo. Para essas sugestões, foram considerados a recorrência, popularidade e qualidade dessas especificações. Dessa forma, as recomendações para realização da atividade são:

- Avanço de 5,00  $\mu\text{m}$ /aresta;
- Profundidade de corte de 0,1 mm;
- Uso de ferramentas revestidas com AlTiN;
- Uso de fluidos lubrificantes combinados com método MQL.

## 5.2 Trabalhos futuros

Com o objetivo de aprimorar a análise realizada, entende-se como relevante a execução de um trabalho experimental para aferir e complementar os resultados obtidos desse projeto. De forma que, ao ter o propósito já definido, torna-se mais viável a condução das atividades para se ter maior aproveitamento da obra. Ademais, espera-se também a complementação de resultados de estudos ainda não ponderados ou que estão para ser publicados.

## Referências Bibliográficas

- ARAMCHAROEN, A.; MANTIVENGA, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, v. 33, p. 402–407, 2009.
- ASLANTAS, K.; ÇIÇEK, A. The effects of cooling/lubrication techniques on cutting performance in micro-milling of inconel 718 superalloy. *Science Direct*, v. 77, p. 70–73, 2018.
- ASM. *Properties and selection - Nonferrous alloys and special-purpose materials*. [S.l.]: ASM International, 1990. Handbook Vol.2. 3470 p.
- AURICH, J. C.; DORNFELD, D.; ARRAZOLA, P. J.; FRANKE, V.; LEITZ, L.; MIN, S. Burrs-analysis, control and removal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 58, p. 519–542, 2009.
- BARROS, H.; MALCHER, L.; DE OLIVEIRA, D. Seleção de parâmetros para microfresamento de inconel 718 através da metodologia indutiva e estudo de caso. *XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM 2022*, 2022.
- BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; CHIFFRE, L. D. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. *International Journal of Materials Processing Technology*, p. 201–207, 2005.
- BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. 2. ed. [S.l.]: New York: Marcel Dekker, 1989.
- BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKINA, B. Advancing cutting technology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 52, p. 483–507, 2003.
- CAMARA, M.; RUBIO, J. C.; ABRAAO, A.; DAVIM, J. State of the art on micromilling of materials, a review. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 28, n. 8, p. 673–685, 2012.
- CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 3, p. 313–332, 2006.
- CHENG, K.; HUO, D. *Micro-Cutting – Fundamentals and Applications*. [S.l.]: Ed. Wiley, United Kingdom, 2013. 366p p.
- COOPER, D. R.; SCHINDLER, P. S. *Métodos de pesquisa em administração*. 7. ed. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2003.
- CÂMARA, M. A. Influência do efeito escala sobre a operação de microfresamento. *Tese (Doutorado) - Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil*, 2014.
- DE OLIVEIRA, D. Retificação de inconel 718 com multicamadas de grafeno dispersas em fluido de corte aplicado via técnica mql. *Dissertação de Mestrado - Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil*, 2017.

- DE OLIVEIRA, D. Efeito escala e integridade superficial no microfresamento da liga de níquel inconel 718. *Tese (Doutorado) - Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil*, 2019.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 5. ed. [S.l.]: São Paulo: Artliber Editora, 2001.
- DOS SANTOS, A. G. Microfresamento de aço inoxidável duplex uns s32205 com ferreamentas de metal duro revestidas com nitreto de titânio. *Tese (Mestrado) - Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil*, 2016.
- DOS SANTOS, A. G.; CUNHA, D. F.; ZIBEROV, M.; HUNG, W. N.; JACKSON, M. J.; SILVA, M. B. D. Avaliação da qualidade de microcanais fabricados por microfresamento no aço inoxidável duplex uns 32205. *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 2015.
- DOS SANTOS, A. G.; DA CUNHA, D.; DA SILVA, M.; JACKSON, M.; ZIBEROV, M. Evaluation of the cutting fluid influence in the burr formation when micro milling inconel 718 and uns s32205 duplex stainless steel. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 6, p. 56931–56944, 2021.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. [S.l.]: São Paulo: Blucher, 1977.
- FILIZ, S.; CONLEY, C. M.; WASSERMEN, M. B.; OZDOGANLAR, O. B. An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, p. 1088–1100, 2007.
- FLYNN, B. B.; SAKAKIBARA, S.; SCHROEDER, R. G.; BATES, K. A.; FLYNN, E. J. Empirical research methods in operations management. *Journal of operations management*, v. 9, p. 250–284, 1990.
- FURUKAWA, Y.; MORONUKI, N. Effect of material properties on ultra precise cutting processes. *Ann. CIRP 37 (1)*, p. 113–116, 1988.
- GARZA-REYS, J. A. Green lean and the need for six sigma. *International Journal of Lean Six Sigma*, p. 226–248, 2015.
- GILLESPIE, L. K. *Hand Deburring: Increasing Shop Productivity*. [S.l.]: Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2003. Handbook Vol.2.
- KISWANTO, G.; AZMI, M.; KO, T. J. The effect of machining parameters to the surface roughness in low speed machining micro-milling inconel 718. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 654, 2019.
- KISWANTO, G.; ZARIATIN, D. L.; KO, T. J. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of aluminum alloy 1100 in micro-milling operation. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, p. 435–450, 2014.
- KITCHENHAM, B.; PRETORIUS, R.; BUDGEN, D.; BRERETON, O.; TURNER, M.; NIAZI, M.; LINKMAN, S. Systematic literature reviews in software engineering – a tertiary study. *Information and Software Technology*, v. 52, p. 792–805, 2010.
- KOU, Z.; WAN, Y.; LIANG, X.; LIU, Z. Burr controlling in micro milling with supporting material method. *Procedia Manufacturing*, v. 1, p. 501–511, 2015.
- KUMAR, P.; KUMAR, M.; SINGH, N. Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling. *ManufacturingLetters*, v. 13, p. 1–5, 2017.

- KURAM, E.; OZCELIK, B. Optimization of machining parameters during micro-milling of ti6al4v titanium alloy and inconel 718 materials using taguchi methody. *Journal of Engineering Manufacture*, 2015.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. d. A. *Metodologia científica*. 2. ed. [S.l.]: São Paulo: Atlas, 1991.
- LEE, K.; DORNFELD, D. A. Micro-burr formation and minimization through process control. *Precision Engineering.*, v. 29, p. 246–252, 2005.
- LEKKALA, R.; BAJPAI, V.; SINGH, K. R.; JOSHI, S. S. Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling. *Precision Engineering.*, v. 35, p. 625–637, 2011.
- LI, K. M.; CHOU, Y. Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, p. 2163–2170, 2010.
- LIU, K.; MELKOTE, S. N. Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 49, p. 650–660, 2007.
- MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. D. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. [S.l.]: Edgard Blucher, São Paulo, 2011.
- MACLURE, K.; PAUDYAL, V.; STEWART, D. Reviewing the literature, how systematic is systematic? *International Journal of Clinical Pharmacy*, v. 38, p. 685–694, 2016.
- MASUZAWA, T. State of the art of micromachining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2000.
- MITTAL, R. K.; KULKARNI, S. S.; SINGH, R. K. Effect of lubrication on machining response and dynamic instability in high-speed micromilling of ti-6al-4v. *Journal of Manufacturing Processes*, p. 413–421, 2017.
- RAJURKAR, K. P.; LEVY, G.; MALSHE, A.; SUNDARAM, M.; MCGEOUGH, J. Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes. *CIRP Ann Manuf Technol*, 2006.
- REED, R. C. *The Superalloys Fundamentals and Applications*. 1. ed. [S.l.]: New York: Cambridge University, 2006. 392 p.
- RODRIGUES, A.; JASINEVICIUS, R. Machining scale: Workpiece grain size and surface integrity in micro end milling. *Microfabrication and Precision Engineering*, p. 26–68, 2017.
- RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. *Lubrificantes nas indústrias – Produção, manutenção e controle*. [S.l.]: Triboconcept - Edições Técnicas, 1990.
- SADIQ, M. A.; HOANG, N. M.; VALENCIA, N.; OBEIDAT, S.; HUNG, W. N. P. Experimental study of micromilling selective laser melted inconel 718 superalloy. *Procedia Manufacturing*, n. 26, p. 983–992, 2018.
- SAEDON, J. B.; SOO, S. L.; K., A. D.; BARNACLE, A.; SAAD, N. H. Prediction and optimization of tool life in micromilling aisi d2 ( 62 hrc) hardened steel. *Procedia Engineering*, n. 41, p. 1674–1683, 2012.
- SON, S. M.; LIM, H. S.; AHN, J. H. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, p. 529–535, 2005.

- STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte II*. 6. ed. [S.l.]: Florianópolis: Editora da UFSC, Série Didática, 2005.
- UCUN, I.; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of inconel 718 super alloy. *Wear*, v. 300, ed. Elsevier, p. 8–19, 2013.
- UCUN, I.; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. The performance of dlc-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of inconel 718. *Precision Engineering*, n. 41, p. 135–144, 2015.
- UNILESTE. Estrutura para projetos de pesquisa. *PROBIC-FAPEMIG/ Unileste-MG*, 2005.
- VAZQUEZ, E.; GOMAR, J.; CIURANA, J.; RODRÍGUEZ, C. A. Analyzing effects of cooling and lubrication conditions in micromilling of ti6al4v. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, p. 906–913, 2015.
- WANG, F.; CHENG, X.; LIU, Y.; YANG, X.; MENG, F. Micromilling simulations for the hard-to-cut material, 13th global congress on manufacturing and management, gcomm 2016. *Procedia Engineering*, n. 174, p. 693–699, 2017.
- ZANELLA, L. C. H. *Metodologia de Pesquisa*. 2. ed. [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina / Sistema UAB, 2013.
- ZIBEROV, M. Microfresamento da liga ti-6al-4v com microferramentas com diferentes revestimentos e aplicação de mql. *Tese (Doutorado) - Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil*, 2018.
- ZIBEROV, M.; DA SILVA, M. B.; JACKSON, M.; HUNG, W. N. P. Effect of cutting fluid on micromilling of ti-6al-4v titanium alloy. *Procedia Manufacturing*, v. 5, p. 332–347, 2016a.
- ZIBEROV, M.; OLIVERIRA, D. D.; SILVA MARCIO, B. D.; HUNG, W. N. P. Wear of tialn and dlc coated microtools in micromilling of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020.

## CAPÍTULO A

### Anexo

- A.1 Tabela de fichamento das características de ferramenta, parâmetros de corte, lubrificação e resultados obtidos em estudos de microfresamento de Inconel 718.

Artigo	Ferramenta			Parâmetros de corte				Lubrificante	Resultados obtidos			
	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio de aresta ( $\mu\text{m}$ )	Revestimento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço ( $\mu\text{m}/\text{aresta}$ )	Profundidade de corte (mm)	Comprimento usinado (mm)		Rugosidade superficial ( $\mu\text{m}$ )	Formação de rebarba concordante ( $\mu\text{m}$ )	Formação de rebarba discordante ( $\mu\text{m}$ )	Redução do diâmetro da ferramenta (%)
Ucun, Aslantas e Bedir (2013)	768	2	AlTiN	48	1,25	0,1	120	Seco	-	-	-	9,26
	768	2	AlTiN	48	2,50	0,1	120	Seco	-	-	-	12,53
	768	2	AlTiN	48	3,75	0,1	120	Seco	-	-	-	6,87
	768	2	AlTiN	48	5,00	0,1	120	Seco	-	-	-	7,28
	768	2	AlTiN	48	5,00	0,15	120	Seco	-	-	-	9,03
	768	2	AlTiN	48	5,00	0,2	120	Seco	-	-	-	3,22
	768	2	DLC	48	1,25	0,1	120	Seco	-	-	-	14,57
	768	2	DLC	48	2,50	0,1	120	Seco	-	-	-	15,49
	768	2	DLC	48	3,75	0,1	120	Seco	-	-	-	8,29
	768	2	DLC	48	5,00	0,1	120	Seco	-	-	-	7,95
	768	2	DLC	48	5,00	0,15	120	Seco	-	-	-	6,97
	768	2	DLC	48	5,00	0,2	120	Seco	-	-	-	6,18
	768	2	TiAlN+AlCrN	48	1,25	0,1	120	Seco	-	-	-	12,76
	768	2	TiAlN+AlCrN	48	2,50	0,1	120	Seco	-	-	-	8,05
	768	2	TiAlN+AlCrN	48	3,75	0,1	120	Seco	-	-	-	6,71
	768	2	TiAlN+AlCrN	48	5,00	0,1	120	Seco	-	-	-	9,07
	768	2	TiAlN+AlCrN	48	5,00	0,15	120	Seco	-	-	-	4,58
	768	2	TiAlN+AlCrN	48	5,00	0,2	120	Seco	-	-	-	2,97
	768	2	TiAlN+WC/C	48	1,25	0,1	120	Seco	-	-	-	13,33
	768	2	TiAlN+WC/C	48	2,50	0,1	120	Seco	-	-	-	13,29
	768	2	TiAlN+WC/C	48	3,75	0,1	120	Seco	-	-	-	13,07
	768	2	TiAlN+WC/C	48	5,00	0,1	120	Seco	-	-	-	9,67
	768	2	TiAlN+WC/C	48	5,00	0,15	120	Seco	-	-	-	7,63
	768	2	TiAlN+WC/C	48	5,00	0,2	120	Seco	-	-	-	6,71
	768	2	AlCrN	48	1,25	0,1	120	Seco	-	-	-	9,91
	768	2	AlCrN	48	2,50	0,1	120	Seco	-	-	-	9,74
	768	2	AlCrN	48	3,75	0,1	120	Seco	-	-	-	5,41
	768	2	AlCrN	48	5,00	0,1	120	Seco	-	-	-	4,9
	768	2	AlCrN	48	5,00	0,15	120	Seco	-	-	-	5,64
	768	2	AlCrN	48	5,00	0,2	120	Seco	-	-	-	3,85
	768	2	WC-Co	48	1,25	0,1	120	Seco	-	-	-	20,9
	768	2	WC-Co	48	2,50	0,1	120	Seco	-	-	-	15,38
768	2	WC-Co	48	3,75	0,1	120	Seco	-	-	-	12,31	



A.1. TABELA DE FICHAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DE FERRAMENTA, PARÂMETROS DE CORTE, LUBRIFICAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS EM ESTUDOS DE MICROFRESAMENTO DE INCONEL 718.

	768	2	WC-Co	48	5,00	0,1	120	Seco	-	-	-	11,41
	768	2	WC-Co	48	5,00	0,15	120	Seco	-	-	-	10,64
	768	2	WC-Co	48	5,00	0,2	120	Seco	-	-	-	7,05
	768	2	AICrN	48	1,25	0,15	120	MQL (Coolube 2210)	-	-	-	4,62
	768	2	AICrN	48	2,50	0,15	120	MQL (Coolube 2210)	-	-	-	2,77
	768	2	AICrN	48	3,75	0,1	120	MQL (Coolube 2210)	-	-	-	3,95
	768	2	AICrN	48	3,75	0,15	120	MQL (Coolube 2210)	-	-	-	3,89
	768	2	AICrN	48	3,75	0,2	120	MQL (Coolube 2210)	-	-	-	2,83
	768	2	AICrN	48	5,00	0,15	120	MQL (Coolube 2210)	-	-	-	3,75
	768	2	AICrN	48	1,25	0,15	120	Seco	-	-	-	8,49
	768	2	AICrN	48	2,50	0,15	120	Seco	-	-	-	6,36
	768	2	AICrN	48	3,75	0,1	120	Seco	-	-	-	5,41
	768	2	AICrN	48	3,75	0,15	120	Seco	-	-	-	6,06
	768	2	AICrN	48	3,75	0,2	120	Seco	-	-	-	2,19
768	2	AICrN	48	5,00	0,15	120	Seco	-	-	-	5,64	
De Oliveira (2019)	400	1,1	AlTiN	25,1	5	0,02	15	Seco	-	-	-	2,58
	400	1,1	AlTiN	50,3	5	0,02	15	Seco	-	-	-	2,2
	400	1,1	AlTiN	75,4	5	0,02	15	Seco	-	-	-	2,55
	400	1,1	AlTiN	50,3	1	0,02	15	Seco	-	-	-	2,4
	400	1,1	AlTiN	75,4	1	0,02	15	Seco	-	-	-	1,55
	400	1,1	AlTiN	50,3	0,1	0,02	15	Seco	-	-	-	3,13
	400	1,1	AlTiN	13,8	5	0,04	30	MQL (Coolube 2210)	0,1663	72,2	35,8	1,12
	400	1,1	AlTiN	13,8	5	0,04	180	MQL (Coolube 2210)	0,1366	127,6	91,8	4,75
	400	1,1	AlTiN	25,1	5	0,04	30	MQL (Coolube 2210)	0,1506	62,6	30	0,74
	400	1,1	AlTiN	25,1	5	0,04	180	MQL (Coolube 2210)	0,1483	96,4	45,8	2,76
	400	1,1	AlTiN	50,3	5	0,04	30	MQL (Coolube 2210)	0,1393	67,2	40,2	2
	400	1,1	AlTiN	50,3	5	0,04	180	MQL (Coolube 2210)	0,141	128,4	111,4	5,4
	400	1,1	AlTiN	75,4	5	0,04	30	MQL (Coolube 2210)	0,104	56,4	33,2	1,32
	400	1,1	AlTiN	75,4	5	0,04	180	MQL (Coolube 2210)	0,152	136	82,2	3,42
Kiswanto, Azmi e Ko (2019)	1000	-	AlTiN	9,43	5	0,01	15	Seco	0,1253	-	-	-
	1000	-	AlTiN	22	2,1	0,01	15	Seco	0,0678	-	-	-
	1000	-	AlTiN	31,43	1,5	0,01	15	Seco	0,0673	-	-	-
	1000	-	AlTiN	9,43	10	0,01	15	Seco	0,2974	-	-	-
	1000	-	AlTiN	22	4,3	0,01	15	Seco	0,0874	-	-	-
	1000	-	AlTiN	31,43	3	0,01	15	Seco	0,0935	-	-	-
	1000	-	AlTiN	9,43	20	0,01	15	Seco	0,4163	-	-	-
	1000	-	AlTiN	22	8,6	0,01	15	Seco	0,0932	-	-	-
1000	-	AlTiN	31,43	6	0,01	15	Seco	0,1011	-	-	-	
	760	2	Sem revestimento	47,75	1,25	0,1	120	Seco	-	-	-	21
	760	2	Sem revestimento	47,75	1,25	0,15	120	Seco	0,07	-	-	-
	760	2	Sem revestimento	47,75	1,25	0,2	120	Seco	-	-	-	-
	760	2	Sem revestimento	47,75	2,5	0,1	120	Seco	-	-	-	15,5
	760	2	Sem revestimento	47,75	2,5	0,15	120	Seco	0,052	-	-	-

A.1. TABELA DE FICHAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DE FERRAMENTA, PARÂMETROS DE CORTE, LUBRIFICAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS EM ESTUDOS DE MICROFRESAMENTO DE INCONEL 718. 67

Ucun, Aslantas e Bedir (2015)	760	2	Sem revestimento	47,75	2,5	0,2	120	Seco	-	-	-	-
	760	2	Sem revestimento	47,75	3,75	0,1	120	Seco	-	-	-	12
	760	2	Sem revestimento	47,75	3,75	0,15	120	Seco	0,16	-	-	-
	760	2	Sem revestimento	47,75	3,75	0,2	120	Seco	-	-	-	-
	760	2	Sem revestimento	47,75	5	0,1	120	Seco	-	-	-	11
	760	2	Sem revestimento	47,75	5	0,15	120	Seco	0,1	-	-	-
	760	2	Sem revestimento	47,75	5	0,2	120	Seco	-	-	-	-
	760	3	DLC	47,75	1,25	0,1	120	Seco	-	-	-	14,5
	760	3	DLC	47,75	1,25	0,15	120	Seco	0,11	-	-	-
	760	3	DLC	47,75	1,25	0,2	120	Seco	-	-	-	-
	760	3	DLC	47,75	2,5	0,1	120	Seco	-	-	-	15
	760	3	DLC	47,75	2,5	0,15	120	Seco	0,037	-	-	-
	760	3	DLC	47,75	2,5	0,2	120	Seco	-	-	-	-
	760	3	DLC	47,75	3,75	0,1	120	Seco	-	-	-	8
	760	3	DLC	47,75	3,75	0,15	120	Seco	0,08	-	-	-
	760	3	DLC	47,75	3,75	0,2	120	Seco	-	-	-	-
	760	3	DLC	47,75	5	0,1	120	Seco	-	-	-	7
760	3	DLC	47,75	5	0,15	120	Seco	0,1	-	-	-	
760	3	DLC	47,75	5	0,2	120	Seco	-	-	-	-	
Aslantas Çiçek (2018)	600	1,75	TiCN	31,4	1	0,1	430	Seco	0,23	-	250	26,66
	600	1,75	TiCN	31,4	1	0,1	430	MQL (DuALL AI 2100)	0,2	-	150	24,16
	600	1,75	TiCN	31,4	1	0,1	430	Etanol	0,41	-	285	36,66
	600	1,75	TiCN	31,4	1	0,1	430	Convencional (DuALL AI 2100)	0,4	-	175	25,83
dos Santos et al. (2021)	381	1	TiN	36	1,5	0,03	-	Submersão (Vasco 1000)	-	5,96	3,16	-
	381	1	TiN	36	1,5	0,03	-	Submersão (Quimatic Superfluido 3)	-	6,64	3	-
	381	1	TiN	36	1,5	0,03	-	Seco	-	23,92	7,71	-
Sadiq et al. (2018)	508	3,175	AlTiN	14	0,8	0,02	480	MQL (Cool2200 EP)	3,2	-	-	-
	508	3,175	AlTiN	14	1,2	0,02	480	MQL (Cool2200 EP)	2,8	-	-	-
	508	3,175	AlTiN	19	0,8	0,02	480	MQL (Cool2200 EP)	3,6	-	-	-
	508	3,175	AlTiN	19	1,2	0,02	480	MQL (Cool2200 EP)	2,7	-	-	-
	508	3,175	AlTiN/Si3N4	14	0,8	0,02	480	MQL (Cool2200 EP)	1,5	-	-	-
	508	3,175	AlTiN/Si3N4	14	1,2	0,02	480	MQL (Cool2200 EP)	2,5	-	-	-
	508	3,175	AlTiN/Si3N4	19	0,8	0,02	480	MQL (Cool2200 EP)	2,9	-	-	-
	508	3,175	AlTiN/Si3N4	19	1,2	0,02	480	MQL (Cool2200 EP)	1,5	-	-	-
	508	3,175	Sem revestimento	14	1,2	0,02	480	MQL (Cool2200 EP)	4	-	-	-
alik (2015)	800	3	-	25,13	2,5	0,05	300	Seco	0,04	-	-	2,43
	800	3	-	25,13	3,4	0,075	300	Seco	0,12	-	-	2,83
	800	3	-	25,13	4,2	0,1	300	Seco	0,18	-	-	3,78
	800	3	-	27,65	2,5	0,075	300	Seco	0,08	-	-	2,68

Kuram e Ozce	800	3	-	27,65	3,4	0,1	300	Seco	0,17	-	-	3,62
	800	3	-	27,65	4,2	0,05	300	Seco	0,12	-	-	4,07
	800	3	-	30,16	2,5	0,1	300	Seco	0,16	-	-	3,72
	800	3	-	30,16	3,4	0,05	300	Seco	0,18	-	-	4,69
	800	3	-	30,16	4,2	0,075	300	Seco	0,25	-	-	5,73

Figura A.1: Tabela de detalhamento das condições de ferramenta, parâmetros de corte, lubrificantes e resultados obtidos nos estudos levados em consideração.