



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

**SELEÇÃO DE PARÂMETROS PARA
FRESAMENTO DE INCONEL 718 COM
FERRAMENTA DE METAL DURO
REVESTIDA COM TiAlN**

Por,
Luís Fillipe Lopes Torres

Brasília, 12 de Maio de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

SELEÇÃO DE PARÂMETROS PARA FRESAMENTO DE INCONEL 718 COM FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDA COM TiAlN

Por,

Luís Fillipe Lopes Torres

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

Banca Examinadora

Profa. Déborah de Oliveira, UnB/ENM (Orientadora)
Prof. Maksym Ziberov, UnB/ENM
Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ENM

Brasília, 12 de Maio de 2022

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

LT693ss Lopes Torres, Luís Fillipe
 Seleção de parâmetros para fresamento de Inconel 718 com
 ferramenta de metal duro revestida com TiAlN / Luís Fillipe
 Lopes Torres; orientador Déborah de Oliveira. -- Brasília,
 2022.
 74 p.

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

 1. Inconel 718. 2. Fresamento de topo. 3. Integridade
 superficial . 4. Rugosidade. I. de Oliveira, Déborah,
 orient. II. Título.

Dedicatória

Este trabalho é dedicado à minha mãe, Celiana Lopes Vieira, e ao meu pai, Sheiler Torres Resende, por possibilitar que eu me dedicasse aos estudos.

Agradecimentos

Sou grato

A Deus pela minha vida, por ter me guiado até aqui e ser fonte de toda sabedoria.

Aos meus familiares, em especial ao meu pai, Sheiler, à minha mãe, Celiana, e à minha irmã, Gabriella, que estiveram sempre ao meu lado, me dando todo o suporte possível. A minha namorada, Maria Luísa, por todo amor e companheirismo. E a todos os meus amigos, especialmente ao Felipe e ao Gabriel, por todo apoio e momentos de descontração.

Ao meu primo, Guilherme, e aos meus amigos, Matheus Xavier, Pedro Henrique, Bárbara, Diana, Leo, Pedro Max, Pedro França, Matheus Campos, João Guilherme, João Pedro e Adolpho, que estiveram comigo em grande parte da minha trajetória na UnB, compartilhando conhecimentos e tornando essa caminhada mais leve e divertida.

À minha orientadora, professora Dra. Déborah de Oliveira, pela disposição na orientação deste trabalho, por toda dedicação, apoio, paciência, confiança e conhecimento transmitido. Sem ela nada disso seria possível.

À Universidade de Brasília (UnB), à Faculdade de Tecnologia (FT) e ao Departamento de Engenharia Mecânica (ENM), que se tornaram minha segunda casa, por todo aprendizado, tanto na minha área de formação quanto na vida. Agradeço, também, ao Laboratório de Usinagem, ao Laboratório de Metrologia e ao Laboratório de Caracterização Termomecânica e Microestrutural de Materiais Inteligentes que possibilitaram a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Antônio Piratelli Filho do Laboratório de Metrologia; aos técnicos Rafael Silva Barros e Adriano Ricardo Lopes do Laboratório de Usinagem; e a professora Dra. Palloma Vieira Muterlle e aos técnicos Ivan Banho de Andrade Reis e Edson Lucas de Almeida do Laboratório de Caracterização Termomecânica e Microestrutural de Materiais Inteligentes; pela disponibilidade e apoio na realização deste trabalho.

À APUAMA, equipe de competição da UnB, pela oportunidade de adquirir novos conhecimentos e amigos, que foram de extrema importância para minha formação.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente fazem parte da minha vida e fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Resumo

O Inconel 718 é uma liga à base de níquel termorresistente, que possui excelentes propriedades mecânicas à elevadas temperaturas. Por isso, é um material amplamente utilizados em motores de turbina à gás, componentes aeronáuticos, reatores nucleares, componentes de compressores, componentes das indústrias automotiva e naval, etc. Essa liga caracteriza-se pela sua baixa usinabilidade, proveniente principalmente da sua baixa condutividade térmica, baixa perda de propriedades mecânicas em altas temperaturas e por seu encruamento quando submetido a esforços de usinagem. Tais características justificam, ainda, os diversos estudos sobre o fresamento do Inconel 718, buscando encontrar os melhores parâmetros de corte, ferramentas de corte, fluidos de corte, técnicas de refrigeração e máquinas-ferramenta, com a finalidade de se obter os melhores resultados na produção das peças usinadas. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é analisar a influência da velocidade de corte na integridade superficial da peça, após o fresamento de topo. Para isso, a velocidade de corte foi variada (30 m/min e 100 m/min) e os outros parâmetros de corte foram mantidos constantes. Foi utilizada uma ferramenta de metal duro revestida com TiAlN (nitreto de alumínio e titânio) com 5 mm de diâmetro. A integridade superficial foi avaliada a partir da verificação do surgimento de trincas decorrentes do processo de usinagem, da verificação do acabamento superficial, da medição da rugosidade (R_a , R_q e R_z) da superfície fresada e da medição da variação da dureza Brinell. Através dos ensaios foi possível verificar uma melhor integridade superficial obtida pelo fresamento de topo com menor velocidade de corte 30 m/min, obtendo valores de rugosidade iguais a $R_a = 0,256 \mu m$, $R_q = 0,318 \mu m$ e $R_z = 1,726 \mu m$. Além disso, este parâmetro possibilitou uma usinagem sem alteração na dureza superficial, indicando que não houve dano térmico ou encruamento, um aumento de 5,3% na dureza foi obtido para a velocidade de corte de 100 m/min. Por fim, foi possível verificar a presença de *chatter* nas superfícies dos canais fresados independente da velocidade de corte adotada.

PALAVRAS CHAVE: Inconel 718, fresamento de topo, integridade superficial, rugosidade.

Abstract

Inconel 718 is a heat-resistant nickel-based alloy that has excellent mechanical properties at high temperatures. Therefore, it is a material widely used in gas turbine engines, aeronautical components, nuclear reactors, compressor components, components from the automotive and marine industries, etc. This alloy is characterized by its low machinability, resulting mainly from its low thermal conductivity, low loss of mechanical properties at high temperatures and its hardening when subjected to machining efforts. This also justifies the various studies on the milling of the Inconel 718, that aims to find the best cutting parameters, cutting tools, cutting fluids, cooling techniques and machine tools, to obtain the best results in the production of machined parts. In this context, the objective of this work is to analyze the influence of cutting speed on the surface integrity of the workpiece, after end milling. For this, the cutting speed was varied (30 m/min and 100 m/min) and the other cutting parameters were kept constant. A carbide tool coated with TiAlN (titanium aluminum nitride) was used. The surface integrity was evaluated by checking the appearance of cracks resulting from the machining process, checking the surface finish, measuring the roughness (R_a , R_q and R_z) of the milled surface and the measurement of the Brinell hardness variation. Through the tests it was possible to verify a better surface integrity obtained by end milling with a lower cutting speed of 30 m/min, obtaining roughness values equal to $R_a = 0.256 \mu m$, $R_q = 0.318 \mu m$ and $R_z = 1.726 \mu m$. In addition, this parameter allowed machining without changing the surface hardness, indicating that there was no heat or work hardening, an increase of 5,3% in hardness was obtained for a cutting speed of 100 m/min. Finally, it was possible to verify the presence of *chatter* on the surfaces of the milled channels regardless of the adopted cutting speed.

KEYWORDS: Inconel 718, end milling, surface integrity, roughness.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Estrutura do Trabalho	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Inconel 718	4
2.1.1 Importância de um bom acabamento e baixos desvios nas peças usinadas	5
2.1.2 Rugosidade	7
2.2 Fresamento	9
2.2.1 Parâmetros de corte no fresamento de topo	11
2.2.2 Forças de corte e potência de usinagem	14
2.2.3 Temperatura no fresamento	16
2.3 Fluido de Corte em Fresamento	18
2.4 Usinabilidade do Inconel 718	22
2.4.1 Ferramentas recomendadas para fresar Inconel 718	24
2.4.2 Influência dos parâmetros de corte na usinagem de Inconel 718	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Procedimento Experimental	33

3.2	Material da Peça e Preparação	34
3.3	Máquina-ferramenta	35
3.4	Ferramentas de Corte	37
3.5	Fluido de Corte	37
3.6	Parâmetros de Corte	39
3.7	Variáveis de Saída Monitoradas	39
3.7.1	Análise Superficial	39
3.7.1.1	Verificação de Trincas Superficiais	40
3.7.1.2	Rugosidade	41
3.7.2	Dureza	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Análise Superficial	44
4.1.1	Verificação de Trincas	44
4.1.2	Acabamento superficial	45
4.1.3	Rugosidade	49
4.2	Dureza	52
4.3	Considerações Finais	53
5	CONCLUSÃO	55
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	55
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICES	61

LISTA DE FIGURAS

1	Quantidade porcentual dos materiais utilizados na fabricação de motor aeronáutico. Adaptado de Campbell (2006).	6
2	Classificação da integridade superficial (MACHADO et al., 2011).	7
3	Alguns parâmetros de rugosidade: a) R_a e b) R_t e R_z (MACHADO et al., 2011).	8
4	Fresamento tangencial e frontal. Adaptado de Ferraresi (1970).	10
5	Fresamento tangencial discordante e concordante (SOUZA, 2007).	10
6	Velocidades da ferramenta e da peça, considerado em três pontos selecionados dos gumes. Adaptado de Stemmer (1993).	13
7	Profundidade de corte a_p , penetração de trabalho a_e e penetração de avanço a_f no fresamento frontal (MACHADO et al., 2011).	13
8	Componentes da força de usinagem nos processos de fresamento (RIBEIRO; ABRÃO; SALES, 2006).	15
9	Efeito da velocidade de corte e profundidade de corte na temperatura de usinagem. Adaptado de Sulaiman, Roshan e Borazjabi (2013).	16
10	Geração de calor e distribuição da temperatura na região do corte (CIMM, 2021).	17
11	Divisão de custos durante o processo de produção de uma peça. SANCHEZ et al. (2010) adaptado por Oliveira (2017).	21
12	Carbonetos presentes na microestrutura do Inconel 718 (OLIVEIRA, 2017).	23
13	Desgastes da aresta principal de corte da ferramenta na usinagem de Inconel 718. Adaptado de Favaro-Filho (2018).	23
14	Usinabilidade relativa do Inconel 718 e outros metais. Adaptado de Ezugwu (2005).	24
15	Variação da dureza de alguns materiais de ferramenta de corte em relação à temperatura. Komanduri (1997) apud Machado et al. (2011).	25
16	Peça utilizada nos experimentos sem preparação.	34
17	Vista isométrica da peça após o corte.	35
18	Dimensões finais, em milímetros (mm), da peça utilizada nos experimentos após o corte.	35

19	Centro de usinagem vertical VEGA XH7132(MCLANE, 2022).	36
20	Fresa de topo de metal duro revestido com TiAlN utilizada nos ensaios (DORMER, 2021).	37
21	Posicionamento dos bocais em relação: (a) - plano de trabalho e (b)- plano de referência.	38
22	Microscópio LEXT OLS4100 da Olympus (AZO, 2022).	40
23	Rugosímetro portátil modelo SJ-201 da Mitutoyo (SEG, 2022).	40
24	Número de companhias que utilizam os parâmetros de rugosidade. Adaptado de DE-CHIFFRE (1999) apud DE-CHIFFRE et al. (2000).	41
25	Durômetro Zwick Roell ZHU250 (DIRECT, 2022).	42
26	Imagem da superfície de Inconel 718 dos 9 canais com aumento de 5000 vezes. . .	45
27	Marcas de vibração no canal 2 ($v_c = 30m/min$) com aumento de 20000 vezes. . .	46
28	Marcas de vibração no canal 4 ($v_c = 100m/min$) com aumento de 20000 vezes. .	47
29	Carbonetos fresados no canal 2 ($v_c = 30m/min$) com aumento de 20000 vezes. .	48
30	Carbonetos fresados no canal 7 ($v_c = 30m/min$) com aumento de 20000 vezes. .	48
31	Desvio aritmético médio (R_a).	49
32	Desvio médio quadrático (R_q).	50
33	Altura máxima do perfil (R_z).	50
34	R_a , R_q e R_z na superfície da peça.	51
35	Dureza Brinell dos canais fresados e da peça de Inconel 718 solubilizado.	53
36	Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 1 com aumento de 5000 vezes.	61
37	Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 1 com aumento de 5000 vezes.	62
38	Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 1 com aumento de 5000 vezes.	62
39	Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 2 com aumento de 5000 vezes.	63
40	Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 2 com aumento de 5000 vezes.	63
41	Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 2 com aumento de 5000 vezes.	64

42	Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 3 com aumento de 5000 vezes.	64
43	Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 3 com aumento de 5000 vezes.	65
44	Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 3 com aumento de 5000 vezes.	65
45	Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 4 com aumento de 5000 vezes.	66
46	Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 4 com aumento de 5000 vezes.	66
47	Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 4 com aumento de 5000 vezes.	67
48	Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 5 com aumento de 5000 vezes.	67
49	Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 5 com aumento de 5000 vezes.	68
50	Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 5 com aumento de 5000 vezes.	68
51	Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 6 com aumento de 5000 vezes.	69
52	Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 6 com aumento de 5000 vezes.	69
53	Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 6 com aumento de 5000 vezes.	70
54	Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 7 com aumento de 5000 vezes.	70
55	Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 7 com aumento de 5000 vezes.	71
56	Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 7 com aumento de 5000 vezes.	71
57	Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 8 com aumento de 5000 vezes.	72
58	Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 8 com aumento de 5000 vezes.	72
59	Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 8 com aumento de 5000 vezes.	73

60	Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 9 com aumento de 5000 vezes.	73
61	Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 9 com aumento de 5000 vezes.	74
62	Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 9 com aumento de 5000 vezes.	74

LISTA DE TABELAS

1	Faixa de composição química em % peso da liga Inconel 718. Adaptado de Bozhong (2019).	5
2	Propriedades do Inconel 718 e outros materiais. Adaptado de Shigley, Mischke e Budynas (2005), Norton (2011), GGD (2021).	5
3	Principais parâmetros de rugosidade. Adaptado de Machado et al. (2011).	8
4	Danos causados à ferramenta pela alta temperatura de usinagem. Adaptado de Mitsubishi (2021).	18
5	Classificação dos metais duros (ISO, 2019a).	27
6	Materiais das ferramentas utilizadas no fresamento de Inconel 718 (ZEILMANN et al., 2012; OLIVEIRA; TEXEIRA; MACHADO, 2015; CELIK et al., 2017; FAVARO-FILHO, 2018; SHOKRANI; NEWMAN, 2018; FINKELDEI; SEXUAUER; BLEICHER, 2019; KURSUNCU, 2020; PEREIRA et al., 2020; GIACCOBO, 2021).	28
7	Configurações de usinagem usadas para as duas pastilhas de fresamento. Adaptado de Holmberg et al. (2020).	29
8	Parâmetros da ferramenta e de corte no fresamento de topo utilizados por Finkeldei, Sexuauer e Bleicher (2019).	29
9	Parâmetros de usinagem. Adaptado de Halim et al. (2019).	30
10	Parâmetros de usinagem. Adaptado de Shokrani e Newman (2018).	30
11	Características da ferramenta e parâmetros de corte no fresamento de topo utilizados por Pereira et al. (2020).	31
12	Parâmetros de usinagem utilizados no fresamento de Inconel 718 (GIACCOBO, 2021).	31
13	Parâmetros de usinagem utilizados no fresamento de Inconel 718 com ferramentas de metal duro por Favaro-Filho (2018).	32
14	Especificações do Centro de usinagem vertical VEGA XH7132 (MADRAS, 2022).	36
15	Características da fresa selecionada (DORMER, 2021).	37

16	Tabela de concentração e as características físico-químicas do fluido BIO100e. Adaptado de BQL (2021).	38
17	Parâmetros de entrada utilizados nos ensaios de fresamento de topo.	39
18	Resultados da média de R_a , R_q e R_z em cada canal	51
19	Características da rugosidade R_a . Adaptado de NBR 8404 (NBR, 1984).	52

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Diâmetro
a_e	Penetração de trabalho
a_f	Penetração de avanço
a_p	Profundidade de corte
f	Avanço
F_{ap}	Força de apoio
F_c	Força de corte
F_e	Força efetiva de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força passiva
F_t	Força ativa
F_u	Força de usinagem
f_z	Avanço por dente
n	Número de rotação por minuto
P_c	Potência de corte
P_f	Potência de avanço
P_m	Potência fornecida pelo motor
Q	Quantidade de calor produzida na usinagem
R_a	Desvio aritmético médio
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil
R_q	Desvio médio quadrático

R_{sk}	Fator de assimetria do perfil
R_t	Altura total do perfil
R_z	Altura máxima do perfil
v_c	Velocidade de corte
v_e	Velocidade efetiva
v_f	Velocidade de avanço
z	Número de dentes

Siglas

CVD	Chemical Vapor Deposition (Deposição Química de Vapor)
HB	Hardness Brinell (Dureza Brinell)
HV	Hardness Vickers (Dureza Vickers)
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
PDV	Physical Vapor Deposition (Deposição Física de Vapor)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Tema

Com o avanço das indústrias nucleares, petrolíferas, automotivas, marítimas e, principalmente, da indústria aeroespacial, houve um aumento da necessidade por materiais com melhores propriedades mecânicas, físicas e químicas, que consigam mantê-las mesmo em elevadas temperaturas. A partir dessa necessidade, foram criadas as ligas termorresistentes e superligas por meio do desenvolvimento metalúrgico em ligas já existentes. O Inconel 718 é uma liga à base de níquel que se enquadra nessa definição, pois possui boa resistência à fadiga, a fluência e a corrosão, mesmo em temperaturas acima de 500°C. Por isso, o inconel 718 desempenha um papel extremamente importante para essas indústrias, principalmente na fabricação de motores de turbina a gás e aeronaves, sendo usada também em veículos espaciais, motores de foguetes, reatores nucleares, submarinos, usinas a vapor e diversos outros equipamentos (EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999; MACHADO et al., 2011).

Se por um lado as boas propriedades mecânicas e sua capacidade de mantê-las mesmo em altas temperaturas é um enorme atrativo para a liga à base de níquel Inconel 718, por outro a torna um grande desafio para indústria metalomecânica, pois, além da capacidade de manter suas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas, possui baixa condutividade térmica, grande encruamento quando submetido aos esforços de usinagem e alta afinidade química com grande parte dos materiais utilizados nas ferramentas de corte. Tais características fazem com que o Inconel 718 seja uma liga de baixa usinabilidade, afetando os processos de usinagem convencional como o fresamento (MACHADO et al., 2011; FAVARO-FILHO, 2018).

Segundo Torres et al. (2021), devido às nobres aplicações mencionadas e aos críticos ambientes de operação, as peças de Inconel 718 muitas vezes estão sujeitas à corrosão e/ou elevados esforços mecânicos, necessitando que o resultado da usinagem gere uma peça de elevada qualidade, minimizando os defeitos que podem levar a falhas. Dentre as falhas que podem surgir durante a usinagem do Inconel 718 está o surgimento de trincas superficiais, ocasionadas pela dilatação ou contração devido à altas temperaturas alcançadas no processo de usinagem, principalmente no fresamento, onde o corte é intermitente e gera ciclos térmicos.

O fresamento é um dos processos de usinagem convencional mais utilizados no mundo, devida a sua capacidade de usinar diferentes materiais, produzir diferentes formas geométricas, alta taxa de remoção de cavaco e a grande variedade de ferramentas de corte. Mas, por causa da baixa usinabilidade das ligas à base de níquel, em especial do Inconel 718, diversas pesquisas são realizadas com o objetivo de encontrar os melhores materiais e tratamentos térmicos para as ferramentas de corte, as melhores técnicas de aplicação de fluido de corte, os fluidos de corte mais eficientes e bem como parâmetros de corte otimizados para serem adotados no fresamento de Inconel 718.

1.2 Motivação

Este trabalho se motiva na dificuldade de usinar a liga à base de níquel Inconel 718, visto sua baixa usinabilidade, devido sua capacidade de manter suas propriedades mecânicas em altas temperaturas, baixa condutividade térmica e rápido encruamento. A otimização dos parâmetros de corte no processo de fresamento de topo dessa liga é importante por causa da sua aplicação nas indústrias, onde requerem uma boa integridade superficial da peça usinada, de modo a evitar possíveis falhas e danos aos equipamentos produzidos. Assim, esse estudo visa contribuir para uma melhor seleção dos parâmetros de corte no fresamento de topo do Inconel 718, com o uso de ferramentas convencionais, uma vez que ainda não está totalmente definido os melhores parâmetros de corte para esse material.

1.3 Objetivos

Neste trabalho, foi realizado o fresamento de topo da superliga à base de níquel Inconel 718, com o objetivo de estudar a influência da velocidade de corte na integridade superficial da peça usinada, por meio da:

- Rugosidade (R_a , R_q R_z) das superfícies usinadas;
- Verificação de trincas superficiais;
- Verificação do acabamento superficial e;
- Dureza Brinell das superfícies usinadas.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos principais para melhor organização, descritos a seguir:

- Capítulo I (Introdução): contextualiza o tema do trabalho de forma sucinta e apresenta seu objetivos ao leitor.

- Capítulo II(Fundamentação Teórica): se trata da revisão bibliográfica que contém os conhecimentos teóricos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, abordando as principais características e a usinabilidade da liga à base de níquel Inconel 718, os conceitos sobre fresamento, as ferramentas utilizadas para o fresamento do Inconel 718 e o uso de fluido de corte no processo de fresamento.
- Capítulo III (Materiais e Métodos): apresenta os materiais e métodos, bem como descreve os equipamentos, as ferramentas e as variáveis de entrada e saída utilizados na realização dos ensaios.
- Capítulo IV (Resultados e Discussão): onde constam os resultados obtidos através dos experimentos e as discussões sobre os mesmos.
- Capítulo V (Conclusão): contém as conclusões obtidas com a finalização do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Ao final dos cinco capítulos, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e utilizadas neste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre a liga de níquel Inconel 718, a importância de um bom acabamento e baixos desvios nas peças usinadas e sobre a rugosidade. É apresentada, também, a revisão bibliográfica sobre o fresamento e suas principais características como os parâmetros de corte no fresamento de topo, as forças e potências de usinagem e a temperatura no fresamento. Além disso, contém a revisão bibliográfica sobre o fluido de corte em fresamento e a usinabilidade do Inconel 718.

2.1 Inconel 718

As ligas termorresistentes, ou ligas refratárias, e superligas são caracterizadas por possuir valores de resistência mecânica elevados e que se mantêm em altas temperaturas, além disso, destacam-se a baixa condutividade térmica, elementos altamente reativos e grande porcentagem de carbonetos dispersos na sua microestrutura, o que dificulta a formação de cavaco durante os processos de usinagem convencionais e as tornam ligas de menor usinabilidade quando comparadas com a maioria das ligas metálicas. As ligas termorresistentes são ligas à base de ferro, à base de níquel e à base de cobalto, que foram desenvolvidas através de processos metalúrgicos em ligas já existentes com objetivo de obter uma melhor relação resistência mecânica-peso, resistência mecânica a quente e resistência à corrosão (MACHADO et al., 2011).

Segundo Ezugwu, Wang e Machado (1999), as ligas à base de níquel são amplamente utilizadas em aeronaves, turbinas a gás marítimas, industriais e veiculares, em veículos espaciais, motores de foguetes, aeronaves experimentais, reatores nucleares, submarinos, usinas a vapor, equipamentos petroquímicos e, principalmente, em motores de turbina a gás, justamente devido à capacidade de manter suas propriedades mecânicas em altas temperaturas.

Dentre as ligas à base de níquel, destaca-se o Inconel 718, que é uma liga endurecida por precipitação. O inconel 718 possui uma matriz austenítica e contém alumínio, titânio ou nióbio, que durante um tratamento térmico apropriado, provocam a precipitação de uma segunda fase (SUGAHARA et al., 2009). A Tabela 1 apresenta a composição química do Inconel 718.

Tabela 1: Faixa de composição química em % peso da liga Inconel 718. Adaptado de Bozhong (2019).

Composição química	% peso	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	C	Mn	Si	S	Cu	Al	Ti	B
Inconel 718	Mín.	50	17	Bal	2,8	4,75						0,2	0,65	
	Máx.	55	21		3,3	5,50	0,08	0,35	0,35	0,015	0,3	0,8	1,15	0,006

As principais características que fazem o Inconel 718 ser amplamente utilizado na indústria aeroespacial, marítima, petroquímica e tantas outras são: elevada resistência mecânica, elevada resistência à corrosão, boa resistência à fadiga, boa resistência à fluência e capacidade de operar continuamente em elevadas temperaturas (SUGAHARA et al., 2009). Além disso, destacam-se suas excelentes características de soldagem, em particular sua resistência à fissuração pós-soldagem (ASM, 1990). Para exemplificar estas propriedades, uma comparação entre as propriedades mecânicas do Inconel 718 e dos aços AISI 304 e SAE 1045 é apresentada na Tab. 2 a seguir.

Tabela 2: Propriedades do Inconel 718 e outros materiais. Adaptado de Shigley, Mischke e Budynas (2005), Norton (2011), GGD (2021).

Material	Propriedades						
	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Dureza (HB)	Condutividade térmica (W/m.K)	Ponto de Fusão (°C)	Densidade (g/cm ³)
Inconel 718	780 - 1275	350 - 1070	206,8	212 - 421	12,6	1260 - 1340	8,22
Alumínio 7075-T651	480 - 540	390 - 490	71,0	150 - 180	146,4	475 - 640	2,75
Aço inoxidável AISI 304	586 - 1276	241 - 1103	189,6	150 - 371	16,2	1400 - 1450	8,00
Aço SAE 1045	565 - 627	310 - 531	206,8	163 - 179	51,9	850 - 1250	7,87

As ótimas propriedades mecânicas do Inconel 718, que se mantêm mesmo em elevadas temperaturas, são o que o torna tão atrativo para as indústrias, principalmente para a aeroespacial. Por outro lado, essas mesmas propriedades são as responsáveis por tornar as ligas à base de níquel muito difíceis de usar em condições econômicas de corte. A usinagem torna-se ainda mais complicada se a liga possuir em sua composição o cromo, como no caso do Inconel 718, para aumentar a resistência à corrosão (MACHADO et al., 2011). A seção 2.5 aprofundará as características de usinabilidade do Inconel 718.

2.1.1 Importância de um bom acabamento e baixos desvios nas peças usinadas

A crescente necessidade mundial por energia e mobilidade vem fazendo com que a demanda por sistemas de turbomáquinas, como motores aeronáuticos, turbinas estacionárias a gás e a vapor, bem como turbocompressores para motores, cresça constantemente (KLOCKE et al., 2014). Esses sistemas requerem materiais com características específicas, presentes nas ligas de níquel, como a de manter suas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas, que é uma das características de destaque do Inconel 718, sendo o material metálico mais empregado na fabricação de componentes para motores *turbofan* de aviões, como é possível observar na Figura 1.

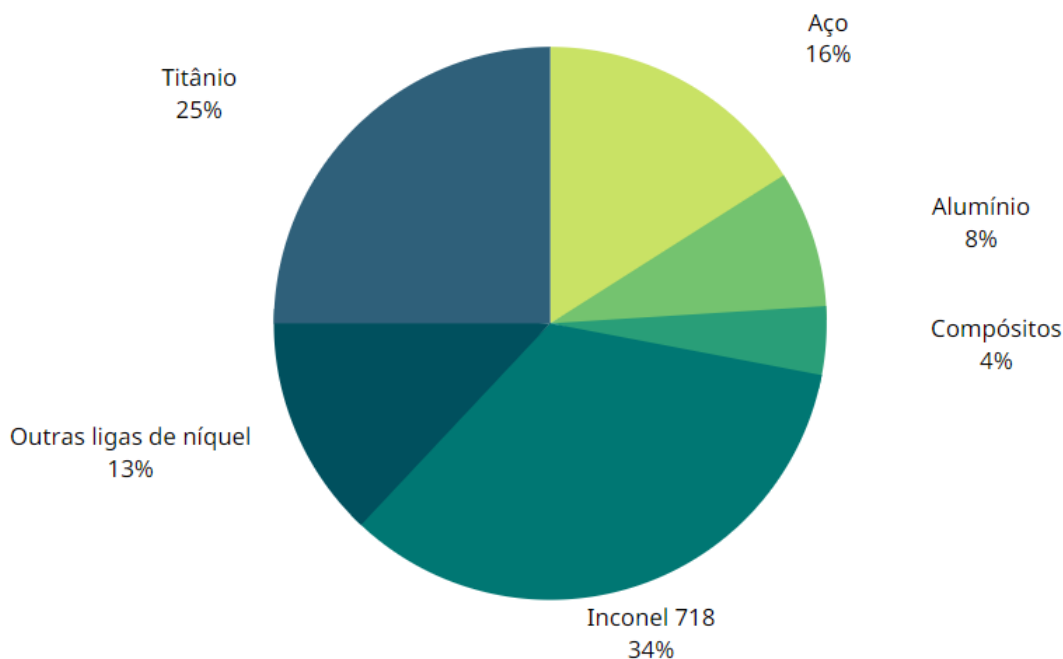


Figura 1: Quantidade percentual dos materiais utilizados na fabricação de motor aeronáutico. Adaptado de Campbell (2006).

Componentes submetidos a altas cargas térmicas e mecânicas durante o seu uso essencialmente necessitam de uma boa integridade superficial, principalmente se utilizados em indústrias cuja segurança é extremamente crítica, como a aeroespacial. As estruturas em aplicações aeroespaciais são muito exigidas, estando sujeitas a severas condições de estresse, temperatura e ambientes adversos. Nessa área, o tamanho das seções das peças são continuamente reduzidos para diminuir o peso, fazendo com que a condição da superfície tenha uma influência cada vez maior em seu desempenho (AXINTE; DEWES, 2002; DUDZINSKI et al., 2004).

O inconel 718, como já citado, é amplamente utilizado na indústria aeroespacial, naval e petrolífera, devido principalmente a sua capacidade de operar em altas temperaturas. Por isso, ele é um material bastante utilizado na fabricação de peças críticas que precisam ser livres de defeitos e possuírem bom acabamento e pequenas tolerâncias dimensionais (CAMPBELL, 2006; ASPINWALL et al., 2007; KLOCKE et al., 2015). Portanto, é importante que a peça produzida possua uma boa integridade superficial.

A integridade superficial de uma peça está diretamente relacionada com o processo de usinagem à qual foi submetida. A usinagem é um processo que submete a peça a diversos fatores que influenciam, diretamente ou indiretamente, na nova superfície da peça. Dentre esses fatores, pode-se citar: geração de calor, vibração, tensões residuais, deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica e, em algumas situações, reações químicas. Portanto, o conceito de integridade superficial vai além de uma dimensão, da textura da superfície ou da sua forma geométrica, é um termo utilizado para descrever a qualidade de uma superfície, analisando não somente alterações na superfície (acabamento) como também alterações em camadas internas

da peça (alterações subsuperficiais) (MACHADO et al., 2011). A Figura 2 apresenta os fatores que interferem na integridade superficial de uma peça.

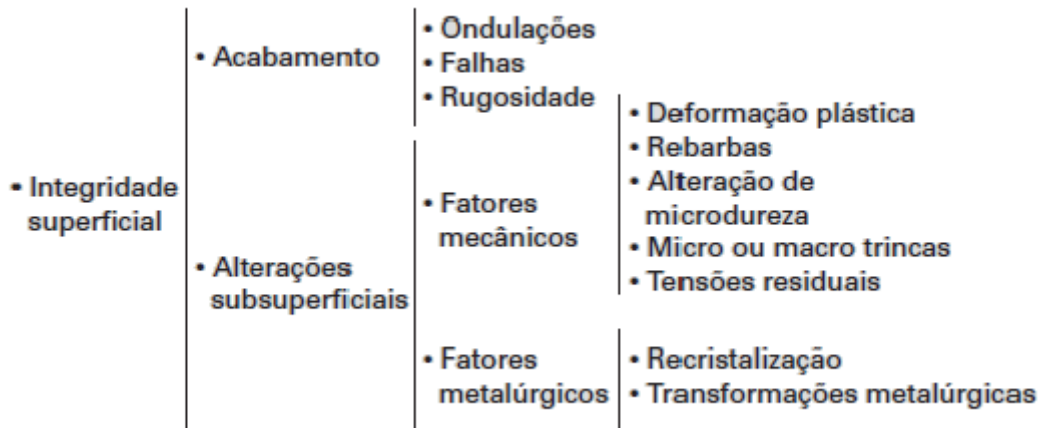


Figura 2: Classificação da integridade superficial (MACHADO et al., 2011).

2.1.2 Rugosidade

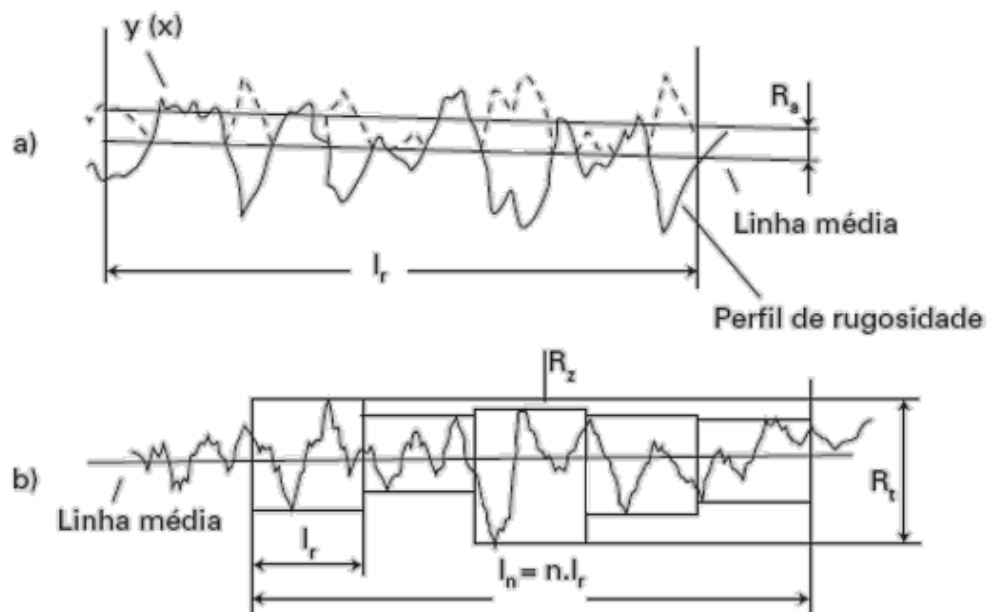
Como é possível observar na Fig. 2, a rugosidade é um parâmetro que está diretamente relacionado com o acabamento da peça usinada, que, por sua vez, interfere em sua integridade superficial. Em razão disso, é essencial que se consiga uma baixa rugosidade nas superfícies das peças de fresadas de Inconel 718, principalmente nas peças utilizadas em aplicações que possam causar danos à vida de seres humanos.

A rugosidade de uma superfície é constituída de irregularidades finas ou de erros micro geométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte, dependendo de vários parâmetros, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, e operação de usinagem. A rugosidade pode ser avaliada por diversos parâmetros, como os apresentados na tabela 3 e demonstrados na figura 3, que podem ser classificados em (MACHADO et al., 2011):

- Parâmetros de amplitude: determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou por ambos, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- Parâmetros de espaço: determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície .
- Parâmetros híbridos: determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

Tabela 3: Principais parâmetros de rugosidade. Adaptado de Machado et al. (2011).

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

Figura 3: Alguns parâmetros de rugosidade: a) R_a e b) R_t e R_z (MACHADO et al., 2011).

De acordo com Alauddin, Baradie e Hashmi (1996), em operações de fresamento de topo, a rugosidade da superfície teórica geralmente depende das condições de corte, material da peça, ferramentas de corte, etc. Em seu estudo, 1996 baseado em diferentes teorias de fresamento, estimou que, para operações de fresamento lateral por fresas de topo sólidas, o valor teórico da rugosidade pode ser estimado pela seguinte fórmula:

$$R_a = \frac{f_z}{32 \cdot (R \pm \frac{f_z \cdot z}{\pi})} \quad (1)$$

Onde:

R_a = rugosidade da superfície (desvio aritmético médio) em μm ;

f_z = avanço por dente em mm/dente;

z = número de dentes da fresa;

R = raio da fresa em mm;

Sinal (+) = para fresamento concordante;

Sinal (-) = para fresamento discordante.

Já o acabamento de superfície produzido em operações de fresamento de face, por pastilhas de fresamento de topo, pode ser expresso como (ALAUDDIN; BARADIE; HASHMI, 1996):

$$R_a = \frac{f_z}{32 \cdot r} \quad (2)$$

Em que:

R_a = rugosidade da superfície (desvio aritmético médio) em μm ;

f_z = avanço por dente em mm/dente;

r = raio da ponta da pastilha da fresa de topo em mm.

2.2 Fresamento

O fresamento é uma das operações de usinagem mais versáteis em termos de geometrias possíveis de serem geradas, devido à sua ferramenta de corte possuir diferentes formas. Grande parte das superfícies não planas e não de revolução de peças mecânicas são obtidas somente por fresamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2000), o fresamento é a operação de usinagem com as seguintes características:

- A fresa, ferramenta de corte, possui arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo;
- A rotação da fresa ao redor de seu eixo proporciona o movimento de corte;
- A peça é fixada na mesa da máquina que, geralmente, é a responsável pelo movimento de avanço, fazendo com que a peça passe sob a ferramenta em rotação, dando a forma e dimensão desejadas.

De acordo com Ferraresi (1970), existem dois tipos básicos de fresamento, representados na Figura 4:

- Fresamento tangencial: Processo de fresamento destinado à obtenção de superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta. Existido processos especiais de fresamentos

tangenciais quando o eixo de rotação da ferramenta for inclinado em relação à superfície originada na peça ou quando a superfície obtida não for plana.

- Fresamento frontal ou de topo: Processo de fresamento destinado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta.

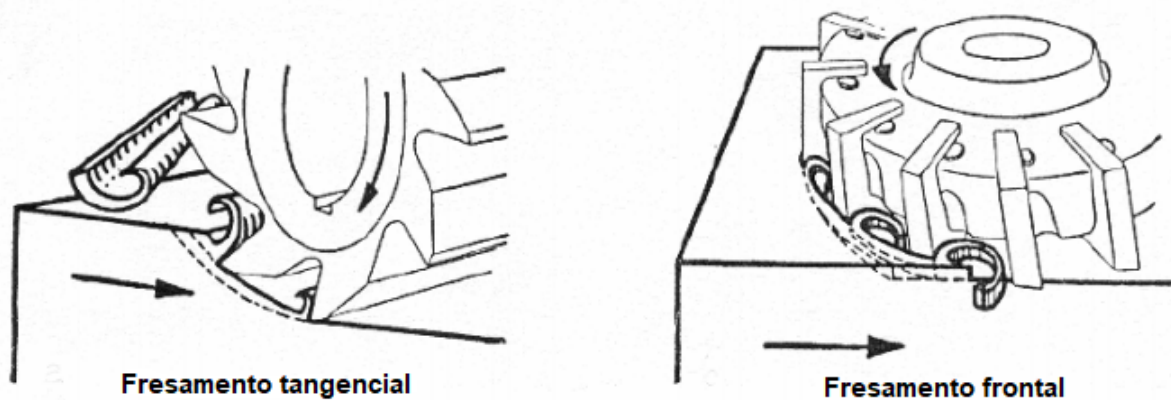


Figura 4: Fresamento tangencial e frontal. Adaptado de Ferraresi (1970).

O fresamento tangencial ainda pode ser dividido em concordante ou discordante, como demonstrado na Fig. 5, de acordo com o ângulo de contato do dente φ , que é o ângulo entre uma linha radial da fresa que passa pelo ponto de contato aresta-peça e uma outra linha radial que passa pelo ponto onde a espessura do cavaco formado (h_0) é zero. Pode-se definir cada um da seguinte maneira (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000):

- Fresamento discordante: É o processo em que o ângulo de contato do dente φ cresce de zero até um valor máximo, tendo o sentido do movimento de avanço contrário ao sentido do movimento rotatório da fresa.
- Fresamento concordante: É o processo em que o ângulo de contato do dente φ começa em um valor máximo e decresce até zero, tendo o movimento de avanço e o movimento rotatório da fresa no mesmo sentido.

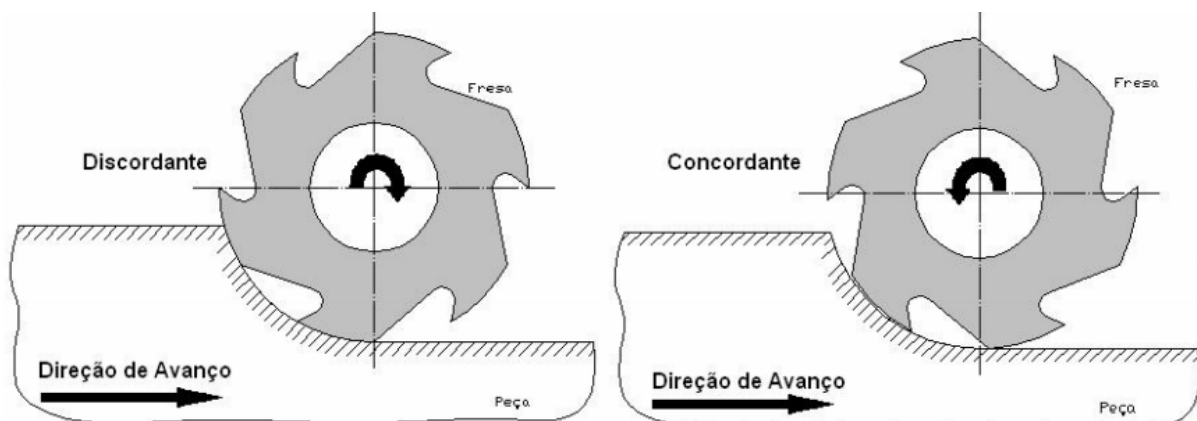


Figura 5: Fresamento tangencial discordante e concordante (SOUZA, 2007).

2.2.1 Parâmetros de corte no fresamento de topo

De um modo geral, para que ocorra um processo de usinagem é necessário que exista movimentos entre a peça e a ferramenta. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2000), os movimentos se classificam como ativos ou passivos. Quando o movimento promove remoção de material, é considerado um movimento ativo. Já o movimento passivo, apesar de ser fundamental para o processo de usinagem, é definido por ser um movimento que não promove a remoção de material.

De acordo com Machado et al. (2011), os movimentos ativos (causam diretamente a saída do cavaco) são:

- Movimento de corte: é o movimento realizado entre a peça e a aresta de corte que, caso não exista movimento de avanço, produz apenas uma única retirada de cavaco.
- Movimento de avanço: é realizado entre a peça e a ferramenta que, junto com o movimento de corte, provoca a retirada contínua de material.
- Movimento efetivo: resultante vetorial dos movimentos de corte e de avanço, realizados ao mesmo tempo.

Os movimentos passivos (não causam diretamente a formação dos cavacos) são (MACHADO et al., 2011):

- Movimento de aproximação: movimento entre a peça e a ferramenta, em que a ferramenta se aproxima da peça antes da usinagem.
- Movimento de ajuste: realizado entre a peça e a aresta de corte para determinar a espessura do material a ser retirado.
- Movimento de correção: é realizado entre a peça e a aresta de corte para compensar o desgaste da ferramenta, variação térmica, deformação plástica, entre outras variações.
- Movimento de recuo: movimento realizado entre a peça e a aresta de corte com o objetivo de afastar a ferramenta da peça, após a usinagem.

É importante diferenciar as direções dos movimentos ativos, que causam diretamente a retirada de cavaco (MACHADO et al., 2011):

- Direção de corte: instantânea do movimento de corte.
- Direção do avanço: instantânea do movimento de avanço.
- Direção efetiva: instantânea do movimento efetivo de corte.

A partir dos movimentos existentes entre a peça e a ferramenta, surgem os parâmetros determinantes no processo de fresamento. Dentre esses parâmetros, os que mais influenciam o processo de fresamento de acordo com Machado et al. (2011) são:

- Avanço (f): é o percurso de avanço em cada volta (mm/rev) ou em cada curso da ferramenta (mm/volta).
- Avanço por dente (f_z): representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta, para ferramentas que possuem mais de um dente, como a fresa. O avanço por dente pode ser calculado como:

$$f_z = \frac{f}{z} \quad [mm/rev] \quad (3)$$

Em que: z = número de dentes.

- Velocidade de corte (v_c): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte, segundo a direção e sentido de corte. A velocidade de corte pode ser calculada através da Eq. (2), apresentada a seguir:

$$v_c = \frac{\pi \cdot \phi \cdot n}{1000} \quad [m/min] \quad (4)$$

Onde:

ϕ = diâmetro da fresa em mm;

n = número de rotação por minuto (rpm).

- Velocidade de avanço (v_f): é a velocidade instantânea da ferramenta de corte, segundo a direção e sentido do avanço, podendo ser calculada de acordo com a Eq. (3):

$$v_f = f \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [mm/min] \quad (5)$$

Onde:

f = avanço em mm/rev (mm por revolução);

f_z = avanço por dente em mm/rev ;

z = número de dentes;

n = número de rotação por minuto (rpm).

- Velocidade efetiva (v_e): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte, segundo a direção efetiva de corte. A velocidade efetiva é calculada vetorialmente conforme a Eq. (4):

$$\bar{v}_e = \bar{v}_c + \bar{v}_f \quad [m/min] \quad (6)$$

As direções dos movimentos ativos possuem a mesma direção e sentido das velocidades de corte que estão representadas na Fig. 6.

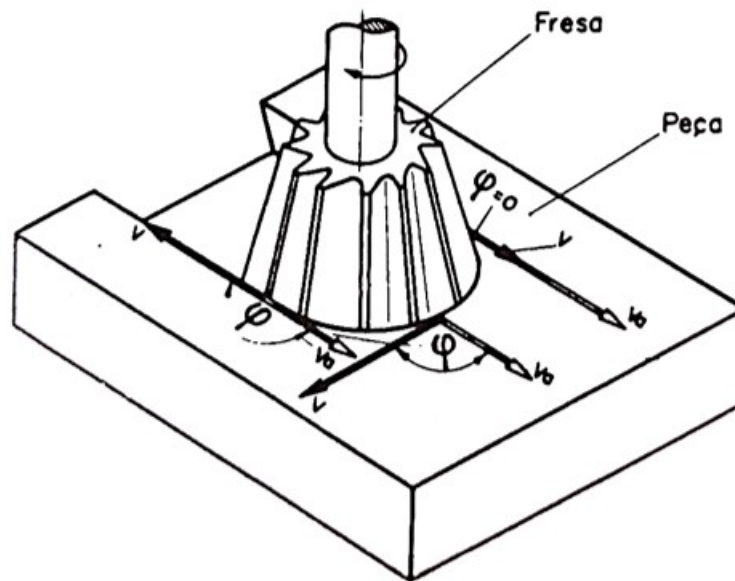


Figura 6: Velocidades da ferramenta e da peça, considerado em três pontos selecionados dos gumes. Adaptado de Stemmer (1993).

Além disso, outros parâmetros que são essenciais ao processo de fresamento são:

- Profundidade de corte (a_p): é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça.
- Penetração de trabalho (a_e): é a penetração da ferramenta em relação à peça.
- Penetração de avanço (a_f): é a grandeza de penetração da ferramenta, medida na direção do avanço.

A Figura 7 demonstra a profundidade de corte, a penetração de trabalho e a penetração de avanço.

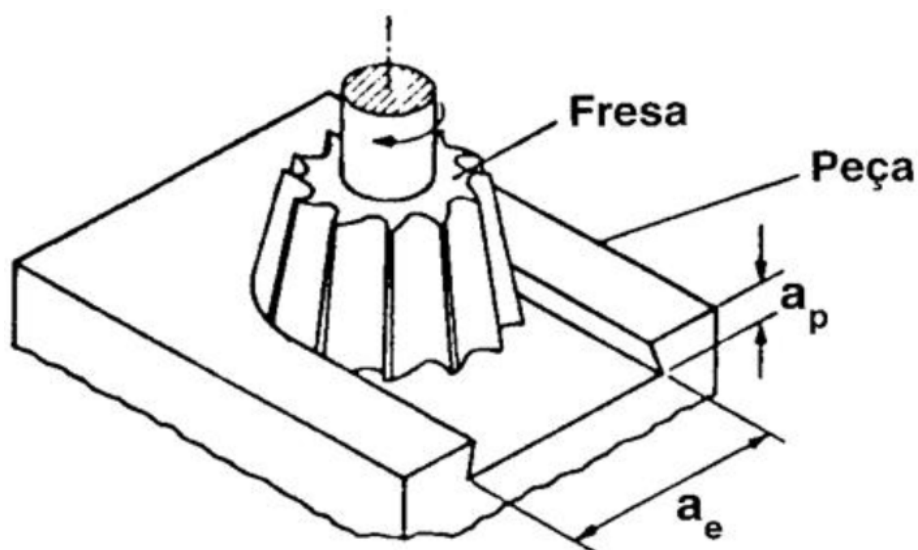


Figura 7: Profundidade de corte a_p , penetração de trabalho a_e e penetração de avanço a_f no fresamento frontal (MACHADO et al., 2011).

2.2.2 Forças de corte e potência de usinagem

As forças de usinagem são variáveis muito importantes no processo de fresamento. Elas influenciam diretamente nas potências de usinagem, no acabamento das peças usinadas e na vida útil da ferramenta de corte. Portanto, as forças de usinagem e suas componentes são fundamentais para o projeto de uma máquina ferramenta ou de uma ferramenta de corte, para a determinação das condições de corte e dos mecanismos de desgaste (RIGATTI, 2010).

De acordo Ribeiro, Abrão e Sales (2006), os fatores que afetam, em maior ou menor grau, as componentes das forças de usinagem na operação de fresamento são: o material a ser usinado e seu estado de dureza; a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte; o material, o material de recobrimento, a geometria e o desgaste da ferramenta; o uso ou não do fluido de corte; os efeitos térmicos; o atrito e as tensões geradas na remoção do cavaco. Portanto, é possível afirmar que o monitoramento destas forças é útil para prever ou acompanhar o desempenho global do processo.

A força de usinagem (F_u) é a força total que atua sobre uma cunha cortante, que pode ser decomposta num plano ou numa direção qualquer. As componentes da força de usinagem que estão contidas no plano de trabalho contribuem para a potência de usinagem, diferente das componentes contidas no plano efetivo de referência que não contribuem para a potência de usinagem, mas ambas assumem uma importância especial no processo de usinagem (FERRARESI, 1970).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2000), de acordo com a norma DIN 6584 a força passiva ou de profundidade (F_p) é a componente perpendicular ao plano de trabalho. Já força ativa (F_t) é a componente que está no plano de trabalho e pode ser decomposta em:

- Força de corte (F_c): projeção de F_u sobre a direção de corte.
- Força de avanço (F_f): projeção de F_u sobre a direção de avanço.
- Força de apoio (F_{ap}): projeção de F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.
- Força efetiva de corte (F_e): projeção de F_u sobre a direção efetiva de corte.

A decomposição da força de usinagem (F_u) é mostrada na figura 8 a seguir, de acordo com a norma DIN 6584.

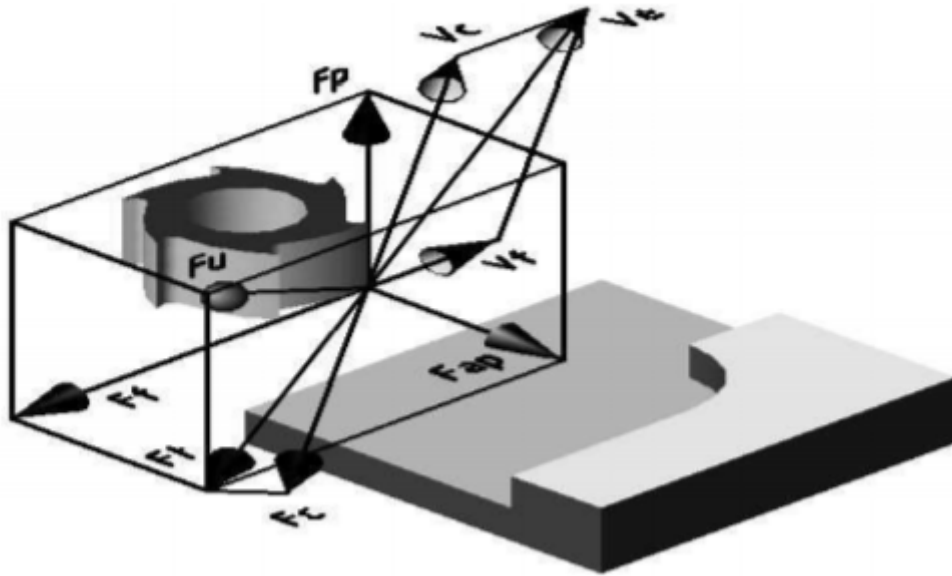


Figura 8: Componentes da força de usinagem nos processos de fresamento (RIBEIRO; ABRÃO; SALES, 2006).

A força de usinagem (F_u) possui a seguinte relação entre as forças de usinagem, passiva e ativa:

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} = \sqrt{F_p^2 + F_{ap}^2 + F_f^2} \quad (7)$$

Potência nada mais é do que a taxa de variação da quantidade de energia gasta durante um intervalo de tempo. Portanto, as potências de usinagem são geradas pela máquina ferramenta para girar seu eixo-árvore e executar o movimento de corte e de avanço, removendo o cavaco. Pode-se então estabelecer as seguintes relações para as potências de corte (P_c) e de avanço (P_f) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000):

- Potência de corte (P_c):

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 75} \quad [CV] \quad (8)$$

Em que:

F_c = força de corte em kgf;

v_c = velocidade de corte em m/min.

- Potência de avanço (P_f):

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{1000 \cdot 60 \cdot 75} \quad [CV] \quad (9)$$

Em que:

F_f = força de avanço em kgf;

v_f = velocidade de avanço em mm/min.

Ainda segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2000), é possível calcular a potência fornecida pelo motor, considerando uma máquina que apresenta apenas um motor para o movimento

de corte e de avanço, podendo desprezar a potência de avanço por ser muito menor do que a potência de corte na maioria das operações de usinagem:

- Potência fornecida pelo motor (P_m):

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \quad [CV] \quad (10)$$

Em que:

P_c = potência de corte em CV;

η = rendimento da máquina operatriz.

2.2.3 Temperatura no fresamento

O estudo das potências de usinagem e dos parâmetros de corte tem correlação direta com a análise da temperatura nos processos de usinagem. Grande parte da potência consumida na usinagem dos metais é convertida em calor perto da aresta de corte da ferramenta, ocasionando, direta ou indiretamente, diversos problemas técnicos e econômicos devido a esse aquecimento (TRENT, 1988). Por estarem diretamente relacionadas com as potências de usinagem, um aumento na velocidade de corte ou na velocidade de avanço proporciona um aumento na temperatura de usinagem, sendo que a velocidade de corte, por ser muito maior do que a velocidade de avanço, na maioria dos processos de usinagem, tem uma maior influência. Outros fatores como a profundidade de corte e o uso de fluido de corte também interferem no comportamento da temperatura durante o processo. A Figura 9 apresenta como alguns desses fatores interferem na temperatura de usinagem.

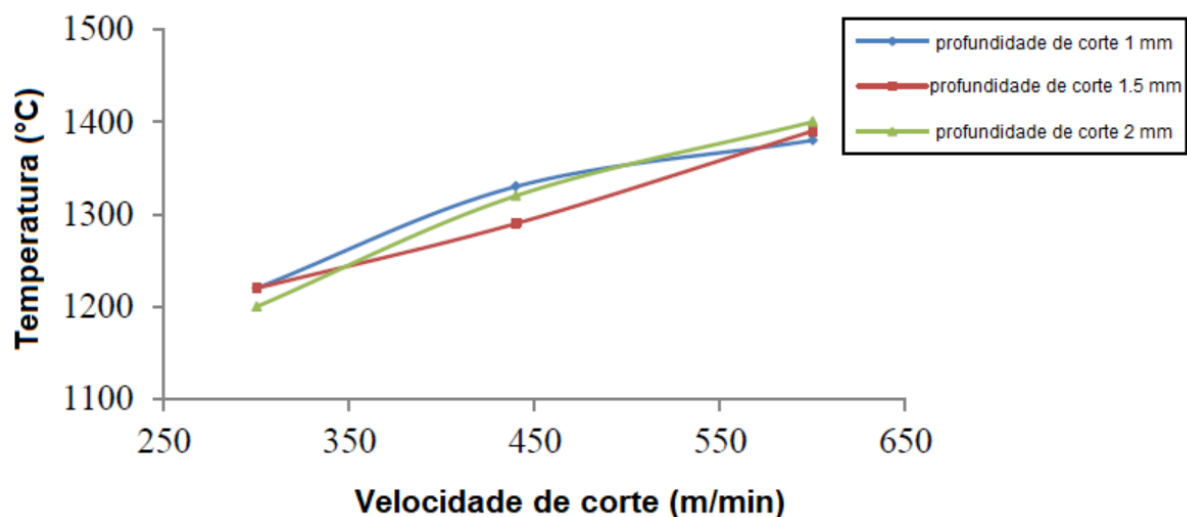


Figura 9: Efeito da velocidade de corte e profundidade de corte na temperatura de usinagem. Adaptado de Sulaiman, Roshan e Borazjabi (2013).

Os trabalhos provenientes do atrito entre o cavaco e a ferramenta, do atrito entre a peça e a ferramenta, assim como da deformação da raiz do cavaco, são convertidos em calor. Por isso

que a condutividade térmica e o calor específico dos materiais em contato, junto com a geometria da ferramenta de corte, são variáveis que interferem na temperatura de usinagem. Cerca de 87 a 90 % do trabalho de usinagem se transforma em calor, podendo determinar a quantidade de calor produzida na usinagem (Q) com a seguinte fórmula (FERRARESI, 1970):

$$Q = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [W] \quad (11)$$

Onde:

F_c = força de corte, em N;

v_c = velocidade de corte, em m/min.

A maior parte do calor gerado na usinagem é dissipada pelo cavaco, mas uma pequena parcela desse calor é transferido para a ferramenta e para a peça, como mostra a figura 10. Em materiais macios e de baixo ponto de fusão, a temperatura da ferramenta não é o maior problema. Porém, em materiais duros e de alto ponto de fusão, como as ligas de níquel, a temperatura da ferramenta torna-se fator de controle da taxa de remoção de material na usinagem (MACHADO et al., 2011).

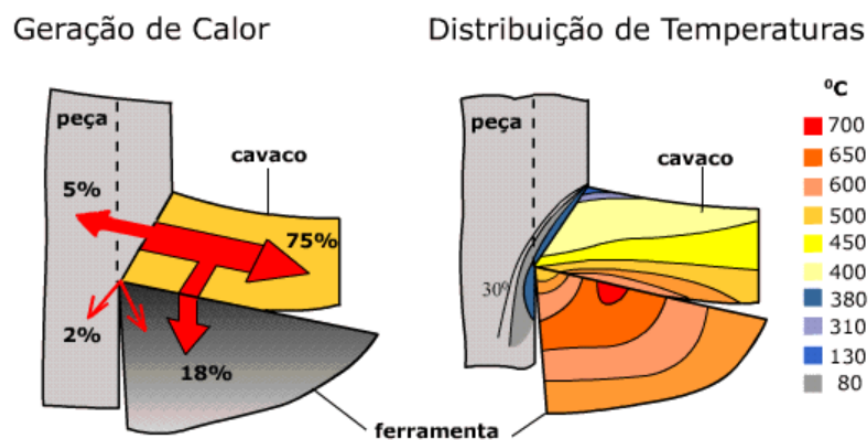


Figura 10: Geração de calor e distribuição da temperatura na região do corte (CIMM, 2021).

Segundo Ozel e Altan (2000), o aumento das velocidades no processo de fresamento resulta em altas temperaturas e em tensões na interface cavaco-ferramenta e peça-ferramenta, que geram distorções do acabamento superficial e alterações microestruturais da peça, comprometendo a sua integridade superficial e causando desgaste excessivo da ferramenta.

Existem diversos danos causados pela alta temperatura na interface peça-ferramenta que ainda podem ser agravados pela baixa condutividade térmica do material usinado, fazendo com que o calor se concentre ainda mais na superfície da peça e da ferramenta. Pode-se citar como alguns desses problemas a adesão do material na ferramenta, reações químicas entre os materiais, queima superficial da peça, deformações plásticas, quebra da ferramenta e desgaste de cratera, entre outros. Em cortes interrompidos, como no caso do fresamento, além de temperaturas

elevadas, existem choques térmicos sofridos pela ferramenta, que afetam diretamente a vida da ferramenta (SUAREZ, 2008). O ciclo térmico devido ao corte interrompido também provoca dilatação e contração, que podem causar trincas térmicas. A tabela 4 exemplifica alguns dos principais problemas gerados pela alta temperatura de corte.

Tabela 4: Danos causados à ferramenta pela alta temperatura de usinagem. Adaptado de Mitsubishi (2021).

Forma do Dano da Ferramenta		Causa
Deformação Plástica		<ul style="list-style-type: none"> • Classe é muito tenaz. • Velocidade de corte é muito alta. • Profundidade de corte e avanço são muito grandes. • Temperatura de usinagem é muito alta.
Trincas Térmicas		<ul style="list-style-type: none"> • Dilatação ou contração devido à temperatura da usinagem. • Classe é muito dura. *Especialmente em fresamento.
Quebra da Craterização *Dano característico de CBN E PCD		<ul style="list-style-type: none"> • Classe é muito tenaz. • Esforço de usinagem é muito alto e causa alta temperatura de usinagem.

Existem diversas técnicas que buscam diminuir os danos causados pelas altas temperaturas de corte e, conseqüentemente, aumentar a vida útil das ferramentas e melhorar a integridade superficial da peça usinada. Uma das mais usadas é a utilização de fluido de corte com a intenção de lubrificar, diminuir o atrito e as forças de corte, reduzir a temperatura de usinagem, aumentar a vida útil da ferramenta e conseguir uma boa qualidade superficial da peça. Assim, o tópico 2.3 abordará mais profundamente a utilização de fluidos de corte nos processos de fresamento.

2.3 Fluido de Corte em Fresamento

Conforme mencionado, os fluidos de corte podem ser utilizados com diferentes objetivos. A utilização de fluido de corte com capacidade lubrificante, por exemplo, tem como principal objetivo reduzir o coeficiente de atrito na usinagem. Conseqüentemente, reduzindo o coeficiente de atrito diminui-se também a geração de calor, os esforços e a potência de corte. Com isso é possível minimizar o desgaste da ferramenta, o dano térmico à estrutura superficial da peça e a dilatação térmica da peça, conseguindo obter tolerâncias estreitas na peça (DINIZ;

MARCONDES; COPPINI, 2000).

Segundo Machado et al. (2011), as principais funções do fluido de corte são:

- Lubrificação a baixas velocidades de corte;
- Refrigeração a altas velocidades de corte;
- Remoção dos cavacos da zona de corte;
- Proteção da máquina-ferramenta e da peça contra oxidação.

Os fluidos de corte se dividem em três categorias: óleos, emulsões e soluções aquosas. Klocke (2009) apresenta as principais características de cada uma delas da seguinte maneira:

- Óleos: podem ser de base vegetal ou mineral, possuindo a vantagem de serem os melhores fluidos de corte em lubrificação, devido à sua viscosidade cinemática que pode chegar a ser 100 vezes maior do que a da água. Possuem boas propriedades de proteção à corrosão e uma maior durabilidade, por causa da sua resistência à bactérias. Por outro lado, sua alta viscosidade pode atrapalhar na sua capacidade de penetração na interface peça-ferramenta.
- Emulsões: são usadas quando busca-se principalmente um bom efeito de resfriamento, majoritariamente ao efeito de lubrificação. Sua capacidade de resfriamento se deve a sua composição basicamente de água (90%) com óleo (10%), deixando suas propriedades físicas próximas às da água. Seu calor específico é cerca de duas vezes maior e sua condutividade térmica é cerca de quatro vezes maior do que a do óleo. Vale ressaltar que os agentes emulsificadores são os responsáveis pela composição homogênea de pequenas gotículas de óleo na água.
- Soluções aquosas: possuem uma boa capacidade de refrigeração, como as emulsões, sendo compostas por mais de 90% de água. O concentrado é desprovido de óleo mineral, podendo conter polímeros, sais ou óleo do tipo sintético em sua composição, que se misturam completamente a água, sem a necessidade do uso de agentes emulsificadores. Tais características deixam as soluções aquosas com propriedades de lubrificação menos favoráveis do que as emulsões.

Para que os fluidos de corte cumpram suas principais funções, são inseridos aditivos aos fluidos a fim de melhorar suas propriedades. Segundo Machado et al. (2011), os principais aditivos utilizados são:

- Antiespumantes: evitam a formação de espumas que poderiam impedir a visibilidade da região de corte e comprometer o efeito de refrigeração do fluido. Para isso, são utilizadas, geralmente, ceras especiais ou óleos à base de silicone no controle da espuma,
- Anticorrosivos: protegem a peça, ferramenta e máquina-ferramenta da corrosão. São produtos à base de nitrito de sódio ou que reagem com ele, bem como óleos sulfurados ou sulfonados, que devem ser usados moderadamente e com precaução devido à suspeita de serem cancerígenos.

- Detergentes: são compostos organometálicos contendo magnésio, cálcio, entre outros, ou ainda alcoóis, que reduzem a deposição de lama, lodo e borras.
- Emulsificantes: os principais tipos são sabões de ácido graxo, gorduras sulfatadas, sulfonatos de petróleo e emulsificantes não iônicos que são responsáveis pela formação de emulsões de óleo na água e vice-versa.
- Surfactantes: possuem a mesma função de garantir a uniformidade das emulsões dos emulsificantes, porém, agem de forma diferente. Os ésteres fosfatos, sulfonatos e alcoóis etoxilados são normalmente empregados como agentes surfactantes.
- Biocidas: são substâncias ou misturas químicas que inibem o desenvolvimento de microrganismos, especialmente fungos e bactérias que, em geral, reagem com o enxofre presente no fluido de corte.
- Aditivos de extrema pressão (EP): conferem ao fluido de corte a capacidade de suportar as elevadas temperaturas e pressões do corte, reduzindo o contato ferramenta-cavaco, em operações mais severas. Os principais aditivos EP são compostos de enxofre, fósforo ou cloro, sendo importante destacar que esses aditivos podem atacar o cobalto presente em ferramentas de metal duro.

Dentre tanta variedade de fluidos de corte, é importante que seja selecionado o melhor para cada aplicação específica. Para isso, os principais fatores de escolha do fluido adequado, de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2000), são:

- Material da peça;
- Condições de usinagem;
- Operação de usinagem;
- Material da ferramenta.

Atualmente existem diversas técnicas de aplicação do fluido de corte, cada uma com suas vantagens e limitações. As mais utilizadas são a técnica convencional e a de Mínima Quantidade de Lubrificante (). Contudo, a técnica de resfriamento criogênico, mais nova que as citadas anteriormente, vem ganhando destaque nos processos de usinagem convencionais.

De acordo com Oliveira (2017), técnica convencional consiste na aplicação do fluido em abundância à baixa pressão e vazão elevada, por isso também chamada de jorro à baixa pressão. Normalmente é a técnica com melhores resultados quando se deseja minimizar os danos térmicos e problemas como distorção na peça, quando o bocal é eficiente e a vazão ajustada. Porém, apesar dos bons resultados no processo de usinagem, a técnica de aplicação convencional apresenta alguns pontos negativos, quanto a sua utilização, que são apresentados a seguir (SANCHEZ et al., 2010; DHAR; KAMRUZZAMAN; MAHIUDDIN, 2006; SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012):

- Elevadas vazões: de 4 a 300 L/min, o que exige bombas mais potentes e reposição periódica, aumentando a quantidade de fluido gasto quando comparado com a MQL;
- Problemas de saúde: podem causar problemas de saúde nos operadores, como dermatites, alergias e câncer, quando manuseados inadequadamente;
- Danos ao meio ambiente: os fluidos exigem tratamento adequado, podendo danificar o solo e recursos hídricos, causando graves prejuízos ao meio ambiente, caso não haja descarte correto;
- Elevados custos no processo: os custos médios da utilização do fluido de corte são de aproximadamente 18% do custo geral do processo, muito maiores do que os custos relacionados às ferramentas.
- Alto custo com descarte: os custos de descarte dos fluidos de corte podem ser de até dois ou quatro vezes o preço de compra nos Estados Unidos e na Europa, respectivamente;

De forma a demonstrar estes altos custos referentes ao uso de fluido de corte, a Fig. 11 apresenta um gráfico com os custos de produção de uma peça, considerando os custos gerados pelo uso de fluidos lubrificantes/refrigerantes.

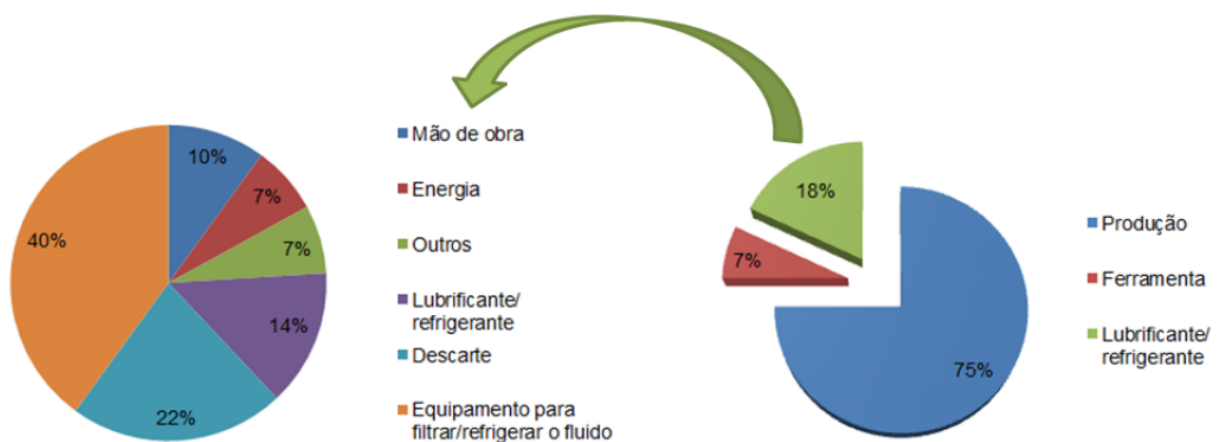


Figura 11: Divisão de custos durante o processo de produção de uma peça. SANCHEZ et al. (2010) adaptado por Oliveira (2017).

Por esses motivos, existe um esforço para reduzir ou até mesmo abandonar a utilização do fluido de corte. Uma das alternativas é a utilização da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL). Nesta técnica, o fluido é pulverizado, usualmente a altas pressões, na região de corte, normalmente, na saída do cavaco ou entre a superfície de folga entre a ferramenta e a peça. São utilizadas vazões bem menores do que na técnica convencional de aplicação, enquanto a vazão na MQL é de 10 ml/min a 20 ml/min, a técnica convencional com lubrificação abundante é de 300 ml/min a 4000 ml/min. Porém, a usinagem com MQL aumenta a emissão de vapor, névoa e fumaça de óleo, tendo a necessidade de um maior controle das emissões (LISBOA; MORAIS; HIRASHITA, 2013).

Outra alternativa, segundo Lisboa, Morais e Hirashita (2013), é a utilização da técnica de resfriamento criogênico que consiste na aplicação, na maioria das vezes, de nitrogênio líquido

(LN₂) ou de dióxido de carbono líquido (LCO₂) para a redução da temperatura durante o processo de usinagem. A utilização do nitrogênio líquido é uma alternativa ambientalmente correta, já que não há fluido de corte para descartar, pois o nitrogênio evapora inofensivamente no ar. Já o dióxido de carbono líquido, quando evapora, se torna um dos gases causadores do efeito estufa, não sendo tão ecologicamente correto. Outro ponto positivo da técnica de resfriamento criogênico é a possibilidade de reciclar o cavaco gerado, uma vez que ele está livre de contaminantes.

2.4 Usinabilidade do Inconel 718

De acordo com Ezugwu (2005), usinabilidade é uma propriedade que descreve com que facilidade o material pode ser cortado no formato desejado em relação às ferramentas e aos processos de usinagem envolvidos. Alguns parâmetros que podem ser usados para medir a usinabilidade são: a vida útil da ferramenta, a taxa de remoção de metal, as forças de usinagem, o consumo de energia, o acabamento superficial, a integridade da superfície do componente usinado e a forma dos cavacos. Diversos outros fatores podem afetar significativamente a usinabilidade como as propriedades do material usinado, as propriedades e geometria das ferramentas de corte, as condições de corte empregadas, a rigidez da máquina-ferramenta, o ambiente de corte, etc.

Como descrito no item 2.1, as ligas à base de níquel são conhecidas por serem muito difíceis de usinar, o que é verdadeiro quando se trata da liga Inconel 718. Ezugwu, Wang e Machado (1999) sintetizam as principais propriedades que fazem com que as ligas de níquel tenham baixa usinabilidade:

- i. Sua resistência se mantém durante a usinagem, devido à sua alta resistência mecânica, mesmo em alta temperatura;
- ii. O encruamento ocorre rapidamente durante a usinagem, contribuindo para o desgaste da ferramenta;
- iii. As ferramentas são sujeitas à altas taxas de desgaste abrasivo, devido aos carbonetos presentes na microestrutura da liga;
- iv. Reações químicas ocorrem devido às altas temperaturas de corte, principalmente quando são utilizadas ferramentas convencionais, o que leva a uma elevada difusão e aumenta a taxa de desgaste;
- v. A adesão das ligas de níquel nas ferramentas de corte é frequente, causando desgaste de entalhe e lascamentos, quando o material se destaca da ferramenta;
- vi. O cavaco gerado é rígido e contínuo, seu controle é complexo e pode levar a altos desgastes de cratera;
- vii. A baixa condutividade térmica gera altas temperaturas na ponta da ferramenta, o que consequentemente gera grandes gradientes de temperatura na ferramenta de corte.

As propriedades acima se enquadram perfeitamente ao Inconel 718. A presença de carbonetos na microestrutura no Inconel 718 foi constatada por Oliveira (2017), como pode ser observado na Fig. 12. Favaro-Filho (2018) observou em seu trabalho a adesão do Inconel 718 na ferramenta de corte, o lascamento na ferramenta devido a adesão e a difusão do material, Fig. 13. As características obtidas pelo autor podem ser relacionadas à baixa condutividade térmica, conforme foi apresentado na Tabela 2, que contém as propriedades de diferentes metais usados industrialmente, o Inconel possui baixa condutividade térmica do Inconel 718, quando comparado com outros metais, propriedade que também é uma propriedade que contribui para a baixa usinabilidade.

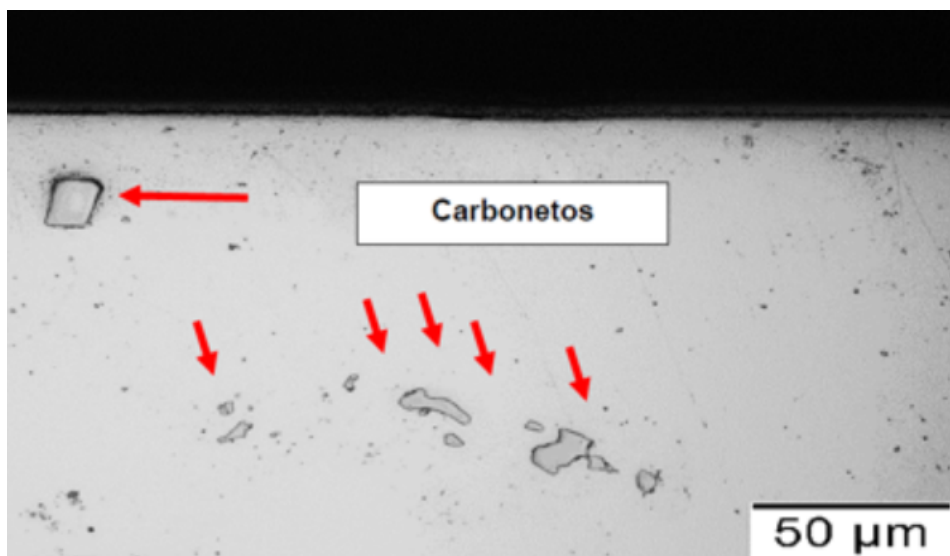


Figura 12: Carbonetos presentes na microestrutura do Inconel 718 (OLIVEIRA, 2017).

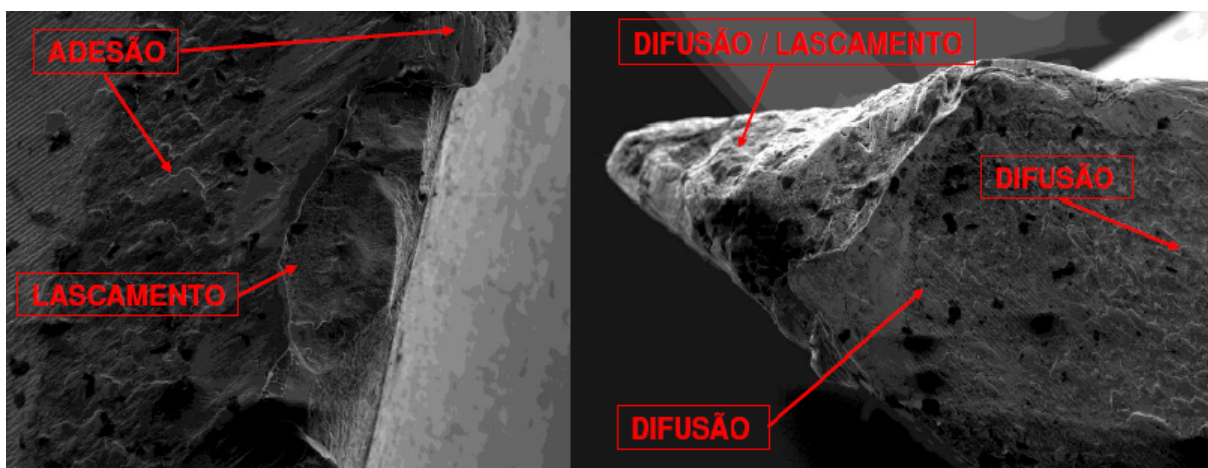


Figura 13: Desgastes da aresta principal de corte da ferramenta na usinagem de Inconel 718. Adaptado de Favaro-Filho (2018).

Ezugwu (2005) utilizou os parâmetros citados para comparar a usinabilidade de diferentes materiais, incluindo o Inconel 718. Conforme pode ser observado na Fig. 14, a usinabilidade do Inconel 718 é aproximadamente 8 vezes menor que a do alumínio, devido às características apresentadas anteriormente.

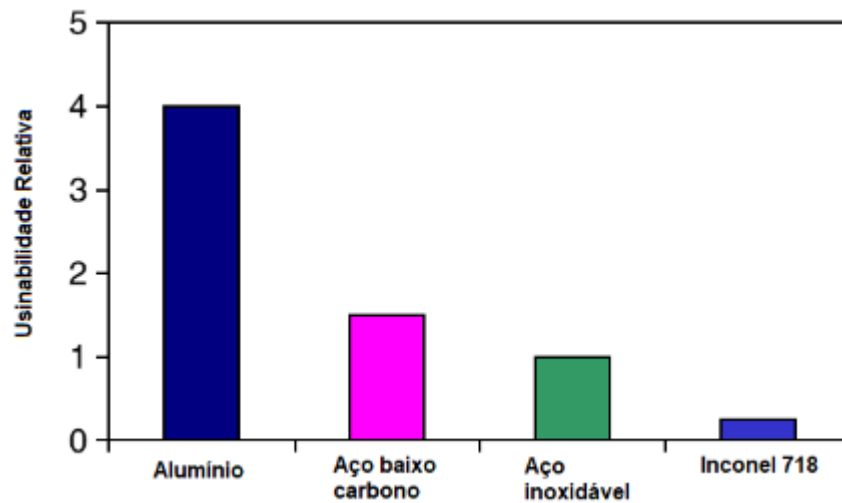


Figura 14: Usinabilidade relativa do Inconel 718 e outros metais. Adaptado de Ezugwu (2005).

Existem diferentes alternativas para minimizar as dificuldades de fresar o Inconel 718. Entre elas estão a grande variedade de ferramentas de corte que o fresamento proporciona, a possibilidade de mudar os parâmetros de usinagem durante o processo e o uso de diferentes fluidos de corte no fresamento, esses fatores serão aprofundados a seguir.

2.4.1 Ferramentas recomendadas para fresar Inconel 718

O fresamento é uma forma de usinagem que possui a vantagem de ter uma ampla diversidade de ferramentas de corte, chamadas de fresas. Existem fresas de diferentes geometrias e materiais, cada uma com sua aplicabilidade específica. Mas, apesar de toda essa quantidade de alternativas de fresas, poucas são as que conseguem usinar o Inconel 718 com eficiência e qualidade.

No geral, o material para ferramenta de corte possui algumas propriedades desejadas, como as listadas abaixo (MACHADO et al., 2011):

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência à compressão;
- Alta resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;

- Ser inerte quimicamente.

Dentre os tipos de desgaste que podem ocorrer durante a usinagem, ressalta-se para as ligas a base de níquel o de entalhe. De acordo com Ezugwu (2005) o entalhe é o modo de falha predominante durante a usinagem da maioria das ligas de níquel, como o Inconel 718, e também das ligas de titânio. O controle do desgaste de entalhe é quase impossível, mas pode ser minimizado com o uso de ferramentas de corte com altos ângulos de ataque, uma vez que mais a aresta de corte é envolvida no corte. Outro fator que contribui para o desgaste excessivo das ferramentas é que a maioria dos materiais do qual são feitas perdem sua dureza em temperaturas elevadas, como observa-se no gráfico da Fig. 15. Por isso, ferramentas de metal duro revestido, cerâmica e Nitreto Cúbico de Boro (CBN) são geralmente utilizadas para usinagem de alta velocidade das ligas à base de níquel (EZUGWU, 2005).

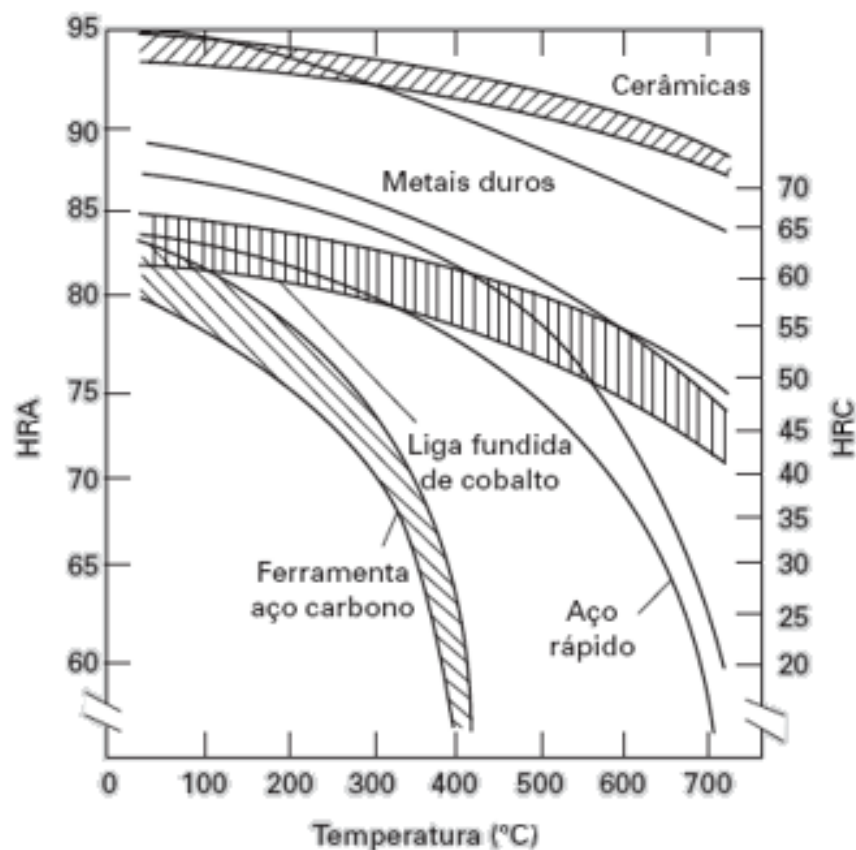


Figura 15: Variação da dureza de alguns materiais de ferramenta de corte em relação à temperatura. Komanduri (1997) apud Machado et al. (2011).









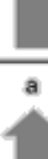
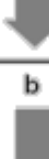


Dentre as ferramentas recomendadas para o fresamento das ligas de níquel, como o Inconel 718, se destacam as ferramentas de metal duro pelo seu custo benefício. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2000), o metal duro, também chamado de carboneto de tungstênio sintetizado, é produzido a partir da metalurgia do pó feito de partículas duras, que ocupam de 60 a 95% do volume do material, finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sintetizados com um ou mais metais do grupo do ferro, originando um corpo de alta dureza e resistência à compressão.

A Norma ISO (International Organization For Standardization) dividiu os metais duros em 3 grandes classes, apresentadas a seguir (MACHADO et al., 2011):

- Classe P: conhecida como classe dos aços ou dos materiais que produzem cavacos longos, adicionado carbonato de titânio (TiC), de tântalo (TaC) e/ou nióbio (NbC) em sua composição;
- Classe M: Uma classe intermediária, também conhecida como classe dos aços inoxidáveis, contendo WC + Co com adição de TiC, TaC e/ou NbC, em menores quantidades que as apresentadas na classe P;
- Classe K: também conhecida como classe dos ferros fundidos ou classe aplicada a materiais que produzem cavacos curtos, contendo carboneto de tungstênio mais cobalto (WC + Co) em sua composição.

Porém, mais recentemente, a Norma ISO adicionou outras classes de grupos de ferramentas que não são exclusivas de metal duro, abrangendo as cerâmicas e os ultraduros. A norma também subdivide as classes em grupos identificados por um número que acompanha a letra e que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste, conforme observa-se na figura 5.

Tabela 5: Classificação dos metais duros (ISO, 2019a).

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros		a	b
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45		
M	Amarelo	Aço inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35		
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35		
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25		
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25		
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25		
a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta. b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.						

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2000), atualmente as ferramentas de metal duro vem sendo revestidas com uma, duas ou até três camadas de carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio, com o objetivo de aumentar a resistência ao desgaste da camada superior da ferramenta. Esse revestimento pode ser realizado através do processo de deposição química de vapor (CVD) ou de deposição física de vapor (PVD), sendo o segundo mais indicado para cortes interrompidos, como no caso do fresamento.

Outro tipo de ferramentas são as de cerâmica, que são divididas em cerâmica à base de alumínio (Al_2O_3) e cerâmicas à base de silício (Si_3N_4). Essas ferramentas possibilitam velocidades de corte muito elevadas, já que suas principais características são a sua capacidade de manter as propriedades mecânicas mesmo em altas temperaturas, conforme exemplificado na Fig. 15, sua elevada dureza e resistência à temperatura ambiente, sua alta resistência à formação de cratera e baixa condutividade térmica (FERRARESI, 1970). Tais características as tornam ferramentas ótimas para o fresamento do Inconel 718, mas com um custo bem maior que as ferramentas de metal duro.

O Nitreto Cúbico de Boro (CBN) é um material sintético obtido através de reações químicas, ele é quimicamente mais estável que o diamante, o que implica numa diminuição do desgaste por difusão, tenaz como os materiais cerâmicos e de dureza elevada, sendo superada apenas pelo diamante (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000). As ferramentas compostas por esse material, assim como as cerâmicas, são excelentes para o fresamento do Inconel 718, no entanto, ferramentas de CBN apresentam um custo ainda mais elevado que as de cerâmica.

A Tabela 6 foi elaborada a fim de observar os principais materiais utilizados no fresamento de topo do Inconel 718, ao decorrer dos anos, por diferentes autores. Através de seus dados é possível analisar, além dos materiais mais utilizados e seus revestimentos, a evolução destes materiais com o passar do tempo.

Tabela 6: Materiais das ferramentas utilizadas no fresamento de Inconel 718 (ZEILMANN et al., 2012; OLIVEIRA; TEXEIRA; MACHADO, 2015; CELIK et al., 2017; FAVARO-FILHO, 2018; SHOKRANI; NEWMAN, 2018; FINKELDEI; SEXUAUER; BLEICHER, 2019; KURSUNCU, 2020; PEREIRA et al., 2020; GIACCOBO, 2021).

Autor(es)	Ano	Material da fresa
Zeilmann et al.	2012	Aço-rápido M2 (DIN 844)
Oliveira, A. R. F.; Teixeira, I. C.; Machado, A. R.	2015	Metal duro (classe "S")
Çelik et al.	2017	Cerâmica (SiAlON)
Favaro Filho, A.	2018	Metal duro (TMG30 e CTS18D)
Shokrani, A; Newman, S. T.	2018	Metal duro revestido com TiSiN
Finkeldei, D.; Sexuauer, M.; Bleicher, F.	2019	Metal duro / Cerâmica (Si_3N_4)
Kursuncu, B.	2020	Metal duro
Pereira et al.	2020	Metal duro (S10) revestido com TiAlN
Giaccobo, L. O. Giaccobo (2021)	2021	Metal duro (ACM300) revestido PVD / Cerâmica (SiAlON)

A partir da tabela 6, é possível perceber que as ferramentas mais utilizadas para o fresamento do Inconel 718 são as de metal duro e cerâmica. O metal duro revestido é muito utilizado pois é uma ferramenta mais barata, quando comparada às de cerâmica, e apresentam bons resultados. Muitos estudos recentes apresentam uma comparação entre esses dois materiais a fim de definir qual apresenta um melhor custo/benefício. Por fim, para complementar os estudos já explicitados, serão apresentados, no item 2.5.2, diferentes parâmetros de corte utilizados no fresamento de Inconel 718, e como a escolha desses parâmetros interferiu na qualidade das peças usinadas.

2.4.2 Influência dos parâmetros de corte na usinagem de Inconel 718

Holmberg et al. (2020) estudou as tensões residuais após a fresamento de Inconel 718. Os testes de fresamento foram realizados em uma fresadora de 3 eixos Quaser, MV204 CPL, utilizando pastilhas de cerâmica (RPGN 090300E 6060) da Sandvik, novas e usadas, sem o uso de fluidos de corte, e ferramentas de metal duro (RNGJ 10T3M0 SGDJ) da Kennametal, novas e usadas, com refrigeração por inundação. Os parâmetros de corte utilizados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Configurações de usinagem usadas para as duas pastilhas de fresamento. Adaptado de Holmberg et al. (2020).

Configurações / Material da ferramenta	v_c [m/min]	v_c no diâmetro engajado [m/min]	v_f [mm/min]	s [rev/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]
Cerâmica	800	500	713	10186	0,07	1,00
Metal duro	40	26	153	509	0,30	0,75

Holmberg et al. (2020) concluiu em seu estudo que: a topografia da superfície e as tensões residuais são muito afetadas pela pastilha (metal duro ou cerâmica) e pelo estado da pastilha (nova ou desgastada); o fresamento com ferramentas de cerâmica resultou em menor rugosidade superficial em comparação com o fresamento com ferramentas de metal duro; e as superfícies fresadas com metal duro apresentam tensões de tração menores e mais rasas em comparação com as superfícies fresadas com cerâmica.

Finkeldei, Sexuauer e Bleicher (2019) utilizaram um centro de usinagem de 5 eixos Hermle C42U, resfriamento por inundação e ferramentas de metal duro, com revestimento Vpr-ZOX, para fresar o Inconel 718. Além disso, utilizaram ferramentas de cerâmica à base de silício Si_3N_4 (EADE1200A6ARJ KYS40). As características das ferramentas e os parâmetros utilizados foram apresentados na tabela 8

Tabela 8: Parâmetros da ferramenta e de corte no fresamento de topo utilizados por Finkeldei, Sexuauer e Bleicher (2019).

Configurações / Material da ferramenta	ϕ [mm]	z [dentes]	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_e [mm]	a_p [mm]
Metal duro	10	4	60	0,050	4	10
Cerâmica	10	4	628	0,035	-	1
Cerâmica	12	6	625	0,032	-	1

De acordo com Finkeldei, Sexuauer e Bleicher (2019), foi possível concluir que a usinagem de alta velocidade gera altas temperaturas dentro da zona de cisalhamento do processo de corte, o que aquece a ferramenta e a peça de trabalho e reduz as forças de corte, bem como o desgaste da ferramenta. Além de que o uso de fresas de topo de cerâmica pode aumentar a produtividade do processo de usinagem, mantendo a qualidade da superfície usinada.

Em outro estudo, Halim et al. (2019) utilizaram, no fresamento de Inconel 718, pastilhas de fresamento de ponta esférica de carboneto cimentado Sumitomo comercialmente disponíveis da classe ACK 300. E uma pastilha PVD multirrevestida com camadas alternadas de TiAlN e

AlCrN atingindo 3 μm de espessura de revestimento. A máquina utilizada foi uma fresadora CNC vertical de três eixos, modelo DMG 635, V Eco. Seu objetivo foi comparar o desgaste da ferramenta no fresamento no corte seco e no corte criogênico, utilizando uma combinação de CO_2 líquido, CO_2 gasoso e ar comprimido. Foram utilizados diferentes combinações dos parâmetros de usinagem mostrados na tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros de usinagem. Adaptado de Halim et al. (2019).

v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_e [mm]	a_p [mm]
120; 130; 140	0,15; 0,20; 0,25	0,4	0,3; 0,5; 0,7

A partir dos dados obtidos, chegou-se à conclusão que o sistema de resfriamento criogênico de CO_2 reduziu a temperatura de corte em 80% em relação ao corte a seco. Conseqüentemente, o corte criogênico conseguiu retardar o desenvolvimento do desgaste da ferramenta e prolongar a vida útil da ferramenta em até 70,8% em relação ao corte a seco (HALIM et al., 2019).

Os autores Shokrani e Newman (2018) estudaram o fresamento de Inconel 718 em alta velocidade, utilizando uma ferramenta de corte de carboneto de tungstênio revestida com TiSiN, com 12 mm de diâmetro e 4 canais. Os parâmetros de corte utilizados no experimento estão explicitados na tabela 10. O objetivo do trabalho foi comparar o resfriamento por inundação com emulsão à base de água e resfriamento híbrido, utilizando a técnica de MQL com óleo de colza puro atomizado e refrigeração criogênica de LN_2 .

Tabela 10: Parâmetros de usinagem. Adaptado de Shokrani e Newman (2018).

v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]	a_e [mm]	Balanço da ferramenta [mm]
140	0,02	10	1	50

Com isso, Shokrani e Newman (2018) chegaram à conclusão que o resfriamento híbrido pode aumentar a vida útil da ferramenta em 77% quando comparado ao resfriamento por inundação e gerar baixa rugosidade superficial. Provando que a usinagem em alta velocidade do Inconel 718, com ferramentas sólidas de carboneto de tungstênio, é viável usando resfriamento híbrido (resfriamento criogênico LN_2 e MQL de óleo vegetal).

Para analisar as forças de corte e desgaste da ferramenta no fresamento de Inconel 718, Pereira et al. (2020) utilizaram um centro de usinagem de três eixos Kondia, fresas de topo de metal duro S10 com micro-ganho com 10% de ligante de cobalto revestidas com TiAlN e diferentes tipos técnicas de lubrificação, como convencional, MQL, resfriamento criogênico de CO_2 e resfriamento híbrido (CrioMQL). Os parâmetros de usinagem utilizados podem ser vistos na tabela 11.

Tabela 11: Características da ferramenta e parâmetros de corte no fresamento de topo utilizados por Pereira et al. (2020).

Configurações / Material da ferramenta	d [mm]	z [dentes]	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_e [mm]	a_p [mm]
Metal duro	10	6	40	0,03	0,2	10

Pereira et al. (2020) chegaram à conclusão que, embora não seja uma técnica ecoeficiente, a usinagem convencional obteve uma vida útil maior para a ferramenta. Além disso, observaram que o resfriamento híbrido conseguiu reduzir as forças de corte em 21% e aumentar a vida útil da ferramenta em 57%, quando comparado com o uso de somente MQL, chegando perto dos resultados com lubrificação convencional. No entanto, o CrioMQL é uma alternativa viável, uma vez que, com ele, consegue-se um equilíbrio entre as questões técnicas e ambientais.

Em sua pesquisa, Giacobbo (2021) comparou o desempenho de ferramentas de metal duro Sumitomo RDET 1204M0EN-G classe ACM300 com revestimento PVD multicamadas (AlTiCrBN) e ferramentas de cerâmica Sialon Kennametal Kendex RPGN120400T01020. Os testes foram realizadas em um centro de usinagem vertical DAHLIH modelo MCV-1020BA. Os parâmetros de usinagem para cada ferramentas podem ser observados na tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros de usinagem utilizados no fresamento de Inconel 718 (GIACCOBO, 2021).

Parâmetro	Sigla	Unidade	Tipo de inserção	
			Metal duro	Cerâmica
Rotação	n	rpm	191	6963
Velocidade de corte	v_c	m/min	22,8	437,5
Velocidade de avanço	v_f	mm/min	150	1200
Profundidade de corte	a_p	mm	0,3	0,3
Avanço por dente	f_z	mm/dente	0,196	0,057
Número de Passes	-	-	3	3
Lubrirrefrigeração	-	-	Abundante	A seco

A partir dos resultados obtidos para cada ferramenta de corte, concluiu-se que ambas as ferramentas não apresentaram variações significativas na qualidade da superfícies usinadas, analisada pela avaliação da rugosidade, e nem afetaram a integridade do material. Contudo, com a utilização da ferramenta de cerâmica, verificou-se que o tempo total de produção foi reduzido 73,3% e custo total da fabricação diminuiu 58,3%, quando comparados com os resultados obtidos pela ferramenta de metal duro (GIACCOBO, 2021).

Com o intuito de analisar a vida útil da ferramenta, a potência de usinagem, a rugosidade das peças usinadas e a temperatura de corte no fresamento de Inconel 718, Favaro-Filho (2018) utilizou centro de usinagem ROMI Bridgeport Discovery 760 e ferramentas de metal duro microgrãos de diferentes classes (TMG30 e CTS18D), sem revestimento. Os testes foram realizados em ambos sentidos de corte, concordante e discordante, e sem o uso de fluidos de corte. As condições de usinagem utilizadas estão explicitas na tabela 13.

Tabela 13: Parâmetros de usinagem utilizados no fresamento de Inconel 718 com ferramentas de metal duro por Favaro-Filho (2018).

Configurações / Ferramenta	d [mm]	z	v_c [m/min]	f_z [mm/volta]	a_p [mm]	a_e [mm]
Metal duro - TMG30	10	4	15 (corte inferior)	0,016 (corte inferior)	6	0,5
			75 (corte superior)	0,031 (corte superior)		
Metal duro - CTS18D	10	4	15 (corte inferior)	0,016 (corte inferior)	6	0,5
			75 (corte superior)	0,031 (corte superior)		

Favaro-Filho (2018) concluiu que a direção de corte e a velocidade de corte são os fatores que mais influenciam a potência de usinagem e que a velocidade de corte e avanço são os fatores que mais influenciam rugosidade superficial média (R_a) durante toda a vida da ferramenta. Além disso, observou que o fresamento discordante não é apropriado para o Inconel 718. Foi possível observar, também, que o aumento da velocidade de corte e do avanço geraram maiores temperaturas de corte, desgastes da ferramenta, potências de usinagem e rugosidade superficial. No entanto, a classe da ferramenta pouco interferiu nos resultados.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados o material da peça e sua preparação, a ferramenta de corte, a máquina-ferramenta e o fluido de corte utilizados nos ensaios. Para completar o capítulo, também são descritos detalhadamente os parâmetros de corte e as variáveis de saída monitoradas nos testes.

3.1 Procedimento Experimental

Com a finalidade de se obter um resultado válido e satisfatório, os testes devem respeitar as normas e devem ser realizados na seguinte ordem:

1. Preparação da amostra: a peça deve ser cortada com uma serra fita, e posteriormente faceada, para que se obtenha as dimensões desejadas, facilitando sua fixação na fresadora, no microscópio e no durômetro.
2. Verificação de trincas pré-existentes: a superfície onde se realizará o fresamento, com os diferentes parâmetros de corte, deve ser previamente verificada, com o microscópio, para trincas já existentes na peça.
3. Medição inicial da dureza Brinell: a medição da dureza da amostra de Inconel 718 na solubilizado para comparação com o valor teórico encontrado na literatura, deverá ser feita na superfície lateral da peça, cinco vezes, com o uso do durômetro, para não prejudicar os ensaios posteriores.
4. Realização do fresamento de topo da amostra: a peça deve ser posicionada no centro de usinagem vertical, onde se realizará o fresamento de topo com a ferramenta, o fluido e os parâmetros de corte estabelecidos.
5. Verificação de trincas: após o fresamento, deverá fazer uma nova verificação da superfície fresada em busca de novas trincas provenientes do processo de fresamento, utilizando o microscópio.

6. Medição da rugosidade: também utilizando o microscópio, deverá se obter os valores de R_a , R_q e R_t , para as superfícies fresadas com diferentes parâmetros de corte.
7. Medição final da dureza Brinell: por último, deverá se obter três medições da dureza Brinell em cada superfície fresada com variados parâmetros de corte, utilizando o durômetro, para comparar com os valor de dureza teórico e valor de dureza medido inicialmente.

3.2 Material da Peça e Preparação

O material da amostra utilizada no procedimento experimental é a superliga de níquel Inconel 718 solubilizada. A composição química desse material foi apresentada na tabela 1. A peça utilizada para nos experimentos, antes da preparação, pode ser observada na figura 62.

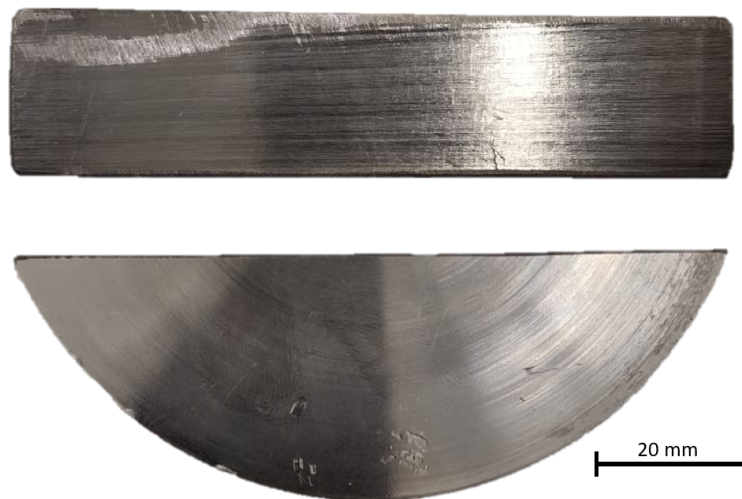


Figura 16: Peça utilizada nos experimentos sem preparação.

A peça terá sua base arredondada cortada com serra fita, tornando-a plana, como mostrado na Fig. 17, para que facilite sua fixação nos suportes da fresadora, do microscópio e do durômetro. A figura 18 apresenta as dimensões da peça após o corte da base arredondada.

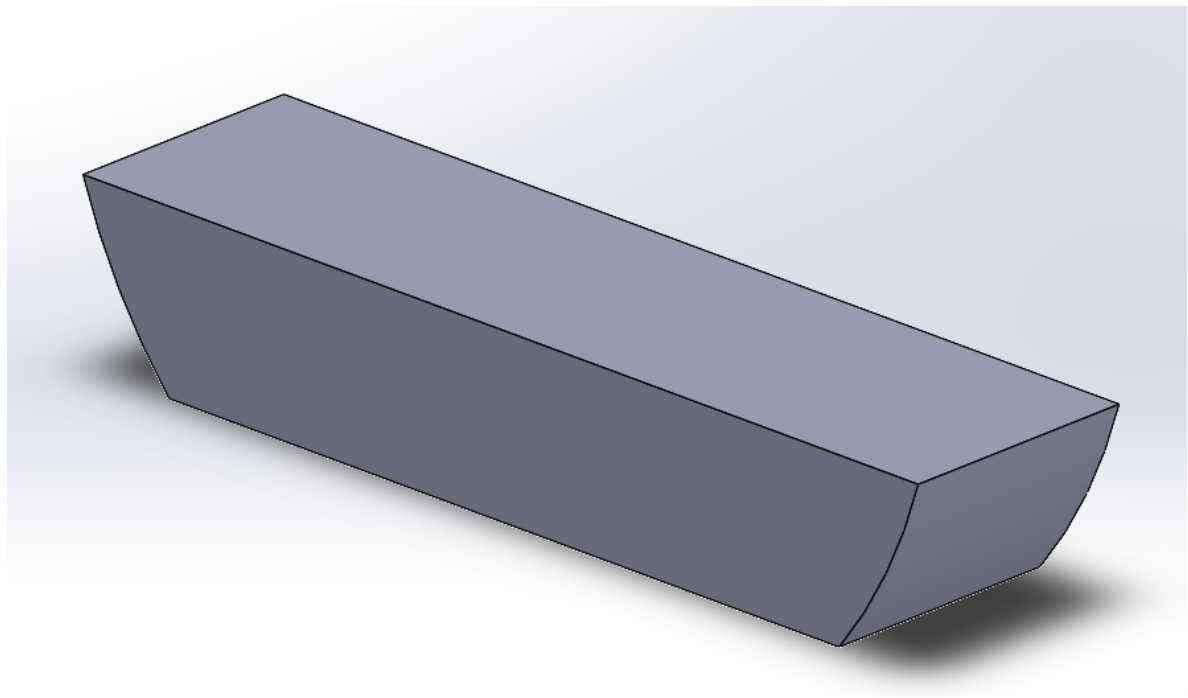


Figura 17: Vista isométrica da peça após o corte.

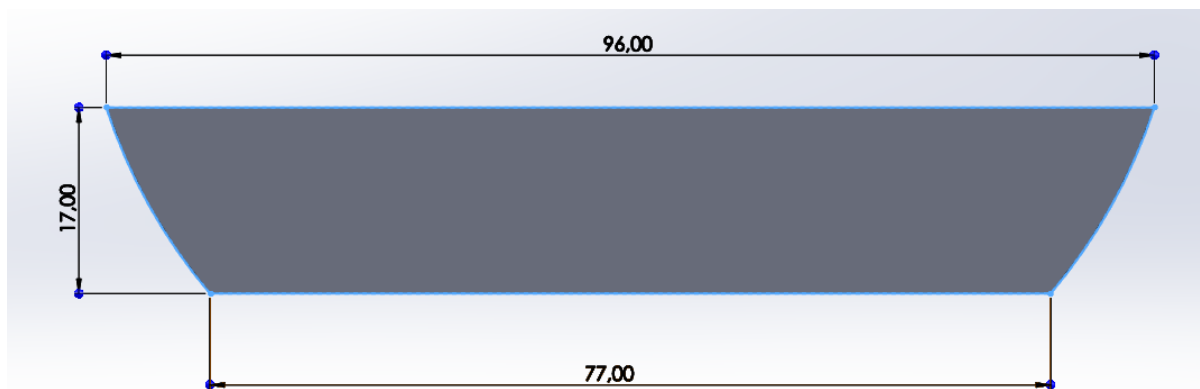


Figura 18: Dimensões finais, em milímetros (mm), da peça utilizada nos experimentos após o corte.

3.3 Máquina-ferramenta

Os ensaios de fresamento de topo da superliga à base de níquel Inconel 718 foram realizados no centro de usinagem vertical VEGA XH7132 (Figura 19), pertencente ao Laboratório de Usinagem da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB). As especificações da máquina estão apresentadas na tabela 14.



Figura 19: Centro de usinagem vertical VEGA XH7132(MCLANE, 2022).

Tabela 14: Especificações do Centro de usinagem vertical VEGA XH7132 (MADRAS, 2022).

Especificações da Máquina	
Modelo	XH7132
Tamanho da tabela	920x320 mm
Deslocamento da mesa (X, Y, Z)	620x350x500 mm
T-slot (número-largura-distância)	3/14/85 mm
Distância da extremidade do fuso ao tampo da mesa	100-600 mm
Distância do centro do fuso até a guia da coluna	395 mm
Conicidade do eixo	BT40
Faixa de velocidade do fuso	60-6000 rpm
Velocidade de alimentação rápida (X, Y, Z)	18000 mm/min
Velocidade de alimentação (X, Y, Z)	2,5 - 3000 mm/min
Capacidade do magazine de ferramentas	16 qtd
Máx. dimensão da ferramenta	ϕ 120 x 200 mm
Máx. peso da ferramenta	8 kg
Precisão de posicionamento	\pm 0,015
Repetir precisão de posicionamento	\pm 0,0075
Motor principal (eixo)	3,7 kW
Motor de alimentação	1,2 kW
Bomba de resfriamento	0,1 kW
Sistema CNC	Fanuc Oi Mate - MD

3.4 Ferramentas de Corte

A ferramenta de corte selecionada para este estudo foi uma fresa de metal duro revestido com TiAlN e 5 mm de diâmetro, da fabricante Dormer, com duas arestas de corte, mostrada na figura 20. As principais características da fresa selecionada podem ser observadas na tabela 15.



Figura 20: Fresa de topo de metal duro revestido com TiAlN utilizada nos ensaios (DORMER, 2021).

Tabela 15: Características da fresa selecionada (DORMER, 2021).

Características da Fresa	Dados
Diâmetro	5 mm
Comprimento da haste	34 mm
Comprimento útil	16 mm
Comprimento total	50 mm
Número de canais	2
Tipo de haste	Cilíndrica
Ângulo de hélice	30°
Ângulo de saída radial	12°
Sentido de corte	Direita
Material	Metal duro
Revestimento	TiAlN

3.5 Fluido de Corte

O fluido de corte utilizado durante o fresamento de topo foi o fluido solúvel sintético biodegradável para usinagem BIO100e da Biolub Química Ltda. É um óleo solúvel sintético que possui ótima durabilidade, excelente poder lubrificante e anticorrosivo, além de não provocar manchas em metais amarelo, alumínio e aço inox (BQL, 2021). O fluido deve ser diluído em água, numa proporção de 1:20 ou 5% (1 litro de óleo para 19 litros de água) ou, em usinagens mais severas, diluído na proporção de 1:10 ou 10% (1 litro de óleo para 9 litros de água).

A tabela 16 apresenta a tabela de concentração e as características físico-químicas do fluido BIO100e. Ressalta-se que durante o uso de fluido de corte deve-se trabalhar com equipamentos de proteção individual (EPI's). Além disso, recomenda-se evitar contato prolongado com a pele (BQL, 2021).

Tabela 16: Tabela de concentração e as características físico-químicas do fluido BIO100e. Adaptado de BQL (2021).

Tabela de Concentração											
Concentração	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%
Leitura Refratômetro	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5
Características Físico-Químicas											
Aspecto-Visual						Amarelo Esverdeado					
Densidade 20/4 C - NBR 7148						1,065 g/cm ³					
Fator de Refração - MT 29						3,33					
PH (3% em Água) - MT 6						9,5					
Corrosão ferro fundido GG 25, sol. 3% - DIN 51.3560/2						Sem corrosão					

O fluido de corte foi aplicado pela técnica convencional com uma vazão de 5,88 l/min, utilizando dois bocais. A configuração de posicionamento dos bocais pode ser observada na figura 21. Nelas são possíveis ver os ângulos dos bocais e a distância dos bocais para a ferramenta.

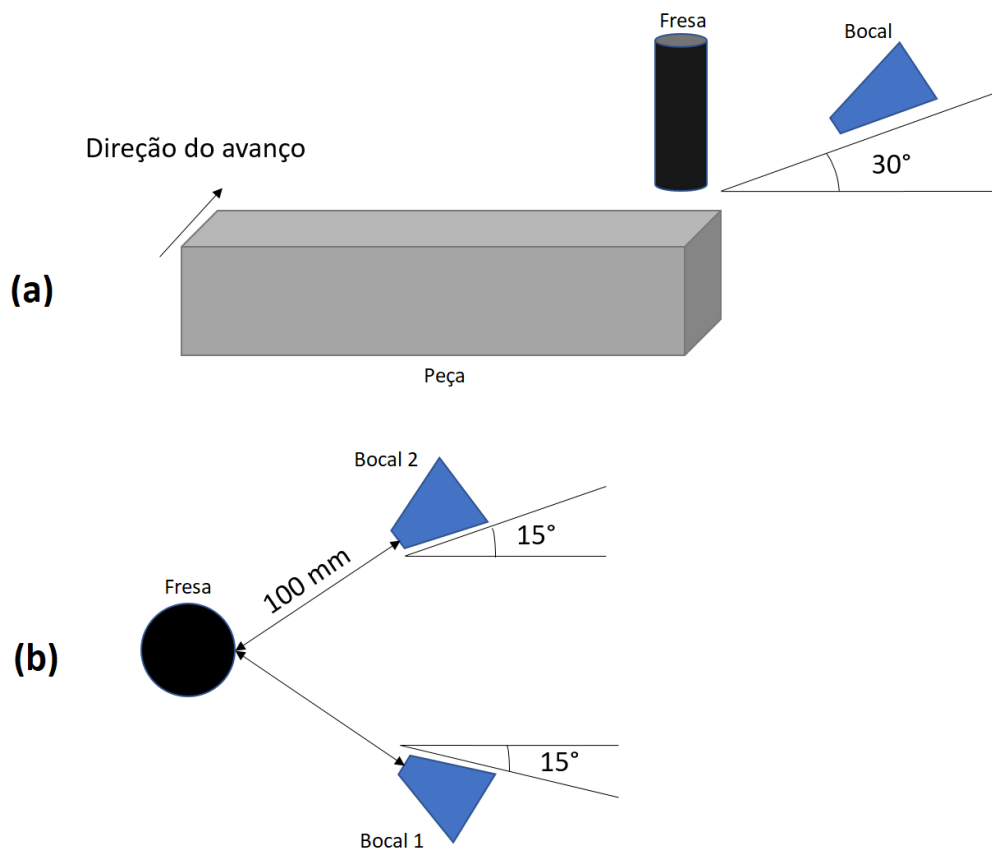


Figura 21: Posicionamento dos bocais em relação: (a) - plano de trabalho e (b)- plano de referência.

3.6 Parâmetros de Corte

Para analisar a influência da velocidade de corte na integridade superficial da peça de Inconel 718 usinada, manteve-se constantes todos os parâmetros de corte, com exceção da velocidade de corte (v_c). Os parâmetros de corte foram selecionados baseado na revisão bibliográfica realizada, com o objetivo de realizar um fresamento para acabamento. A tabela 17 apresenta as variáveis de entrada utilizadas nos ensaios de fresamento de topo do Inconel 718. Vale ressaltar que para cada velocidade de corte foram realizadas duas réplicas. O ensaio com velocidade de corte igual a 30 m/min foi repetido ao final dos primeiros ensaios, com o objetivo de analisar a influência do desgaste sofrido pela ferramenta de corte.

Tabela 17: Parâmetros de entrada utilizados nos ensaios de fresamento de topo.

Parâmetro	Valor/especificação
Velocidade de corte (v_c)	30 m/min
	100 m/min
Rotação (n)	1900 rpm
	6000 rpm
Avanço por dente (f_z)	0,02 mm/dente
Número de dentes (z)	2
Velocidade de avanço (v_f)	76 mm/min
	240 mm/min
Profundidade de corte (a_p)	0,5 mm
Penetração de trabalho (a_e)	5 mm
Fluido de corte	BIO100e
Vazão do fluido de corte	5,88 l/min
Técnica de aplicação de fluido de corte	Convencional

3.7 Variáveis de Saída Monitoradas

As variáveis de saída empregadas nesta pesquisa são: análise superficial, composta pela rugosidade e verificação de presença de trincas na superfície usinada, e dureza.

3.7.1 Análise Superficial

Para a realização da análise superficial, que envolve a verificação de trincas na superfície usinada, foi utilizado o microscópio de medição 3D a laser LEXT OLS4100 da Olympus (figura 22). Já para a medição da rugosidade foi utilizado o rugosímetro portátil modelo SJ-201 da Mitutoyo (Fig. 23).



Figura 22: Microscópio LEXT OLS4100 da Olympus (AZO, 2022).



Figura 23: Rugosímetro portátil modelo SJ-201 da Mitutoyo (SEG, 2022).

3.7.1.1 Verificação de Trincas Superficiais

A formação de trincas na superfície usinada é uma descontinuidade comum durante o processo de fresamento do Inconel 718, onde se atinge elevadas temperaturas e ocorre um ciclo térmico devido ao corte interrompido. Por isso, é importante fazer uma verificação da superfície em busca de trincas formadas pelo processo de fresamento. Para isso, é essencial que se faça uma análise antes, para verificar se já existe trincas ocasionadas no processo de preparação do material, e depois da usinagem, para verificar se surgiu novas trincas provenientes do processo de fresamento. As imagens da superfície fresada foram obtidas através do microscópio, as ampliações utilizadas foram de 5000, 10000 e 20000 vezes, mas apenas algumas imagens foram selecionadas para a sessão de resultados.

3.7.1.2 Rugosidade

Dentre os parâmetros de rugosidade, serão medidos três: o desvio aritmético médio (R_a), o desvio médio quadrático (R_q) e a altura máxima do perfil (R_z). Esses três estão entre os principais parâmetros de rugosidade mais utilizados para avaliar a qualidade da superfície usinada, conforme pode ser observado no gráfico da figura 24, de uma pesquisa CIRP industrial envolvendo 284 empresas em 18 países. De acordo com a norma NBR ISO 4287 (ISO, 2002), para todas medições, serão adotados um *cut-off* de 0,8 mm, um comprimento de amostragem de 4 mm e uso do filtro de Gauss. A peça usinada foi limpa e preparada para a medição. Cada superfície usinada com os diferentes parâmetros de corte teve a rugosidade medida cinco vezes, tentando cobrir uma maior área da superfície fresada e buscando a validação dos resultados. Além disso, todas as medições de rugosidade foram realizadas de forma centralizada e na direção do avanço.

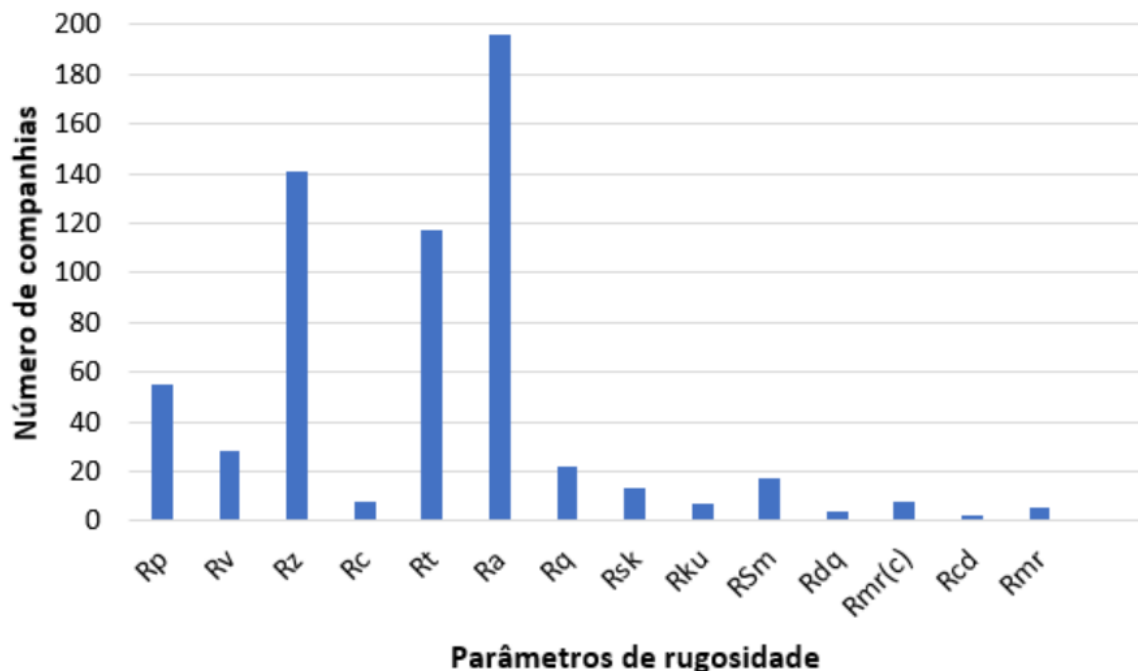


Figura 24: Número de companhias que utilizam os parâmetros de rugosidade. Adaptado de DE-CHIFFRE (1999) apud DE-CHIFFRE et al. (2000).

3.7.2 Dureza

Para a medição da dureza das peças após o fresamento nas diferentes condições de corte (tabela 17), foi utilizado o durômetro Zwick Roell ZHU250 (Fig. 25). Esse equipamento consegue medir diversas escalas de dureza, sendo uma delas a dureza Brinell (HB), podendo comparar o valor teórico de 212 HB para o Inconel 718 solubilizado, com os valores medidos antes e depois do fresamento com diferentes parâmetros de corte.



Figura 25: Durômetro Zwick Roell ZHU250 (DIRECT, 2022).

Para a medição da dureza Brinell se utiliza como penetrador uma esfera de tungstênio de diâmetro definido e uma força normalizada. A esfera de tungstênio pressionada contra o material com uma certa força fará uma deformação na área de ensaio, chamada de calota Brinell. O diâmetro dessa calota será medido e relacionado com a carga aplicada para se obter o valor da dureza Brinell, calculado da seguinte forma:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (12)$$

Em que:

HB = dureza Brinell;

F = carga aplicada;

d = diâmetro da calota;

D = diâmetro da esfera.

A carga aplicada durante o teste pode variar entre 500 e 3000 kgf, mantida constante por um período de 10 a 30 segundos. No ensaio de dureza será utilizado um penetrador esférico de tungstênio de 2,5 mm de diâmetro e uma carga aplicada de 187,5 kgf, ou seja, a escala 2,5/187,5 de dureza Brinell. O ensaio de dureza seguirá a norma ABNT NBR ISO 6506-1 (ISO, 2019b). A temperatura do ambiente foi mantida dentro do padrão estabelecida pela norma, assim como o diâmetro de impressão, d, deve ficar entre os valores de 0,24 D e 0,6 D, em que D é o diâmetro da esfera. Para se obter melhores resultados, a amostra terá sua superfície lixada antes dos ensaios e respeitará a distância entre as medições determinada.

Serão realizadas 5 medições de dureza na superfície onde posteriormente se realizará os ensaios. Já as medições em cada canal serão repetidas 3 vezes para a obtenção da média e do desvio padrão. A distância entre as medições devem ser respeitadas para que não haja

interferência de uma medição em outra.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados de rugosidade, dureza e imagens da superfície, para a verificação de trincas superficiais, obtidos antes e após o fresamento de topo do Inconel 718. Os resultados estão tratados e apresentados em forma de gráficos e imagens.

4.1 Análise Superficial

4.1.1 Verificação de Trincas

A verificação de trincas pré-existente na peça, possivelmente ocasionadas pelo processo de preparação do experimento, foi realizada com o microscópio de medição 3D a laser LEXT OLS4100 da Olympus. Durante o processo de verificação foram utilizadas lentes de ampliação de 5000, 10000 e 20000 vezes, a fim de observar atentamente toda a superfície da peça. Não foi encontrada nenhuma trinca pré-existente na superfície da peça onde foram fresados os canais.

Novas trincas podem surgir devido às elevadas temperaturas atingidas e ao ciclo térmico ocorrido durante o processo. As altas temperaturas ocorrem pelo fato do Inconel 718 possuir baixa condutividade térmica, concentrando o calor na superfície da peça usinada e na ferramenta de corte. Já o ciclo térmico é algo natural do processo de fresamento, onde o corte é intermitente. Portanto, o surgimento de trincas superficiais era mais esperado no fresamento com maior velocidade de corte (100 m/min), que proporcionará maiores temperaturas e desgastes nas ferramentas.

A verificação de trincas após o fresamento foi realizada com lentes de ampliação de 5000, 10000 e 20000 vezes, em todos os canais e ao longo de todo seu comprimento. Não foram encontradas trincas provenientes do processo de fresamento de topo em nenhum canal. Este resultado é similar ao apresentado por Giacobbo (2021) que realizou o fresamento de Inconel 718 com ferramentas de cerâmica e de metal duro, e também realizou análise superficial para verificar a presença de trincas. O autor reportou que não houve surgimento de trincas na superfícies usinada, isto é, não foram encontradas trinca nas superfícies usinadas com ambas ferramentas. Assim, é possível constatar que os parâmetros de corte otimizados e a utilização de fluido de

corde conseguiram impedir o surgimento de novas trincas, oriundas das elevadas temperaturas e do ciclo térmico.

4.1.2 Acabamento superficial

Foram obtidas imagens com o uso do microscópio de todos os canais, ao longo de todo comprimento, e foram selecionadas as imagens do centro de cada um para ser apresentada neste trabalho. O restante das imagens obtidas na realização deste trabalho pode ser visto no apêndice. A figura 26 apresenta as superfícies de cada canal aumentadas em 5000 vezes.

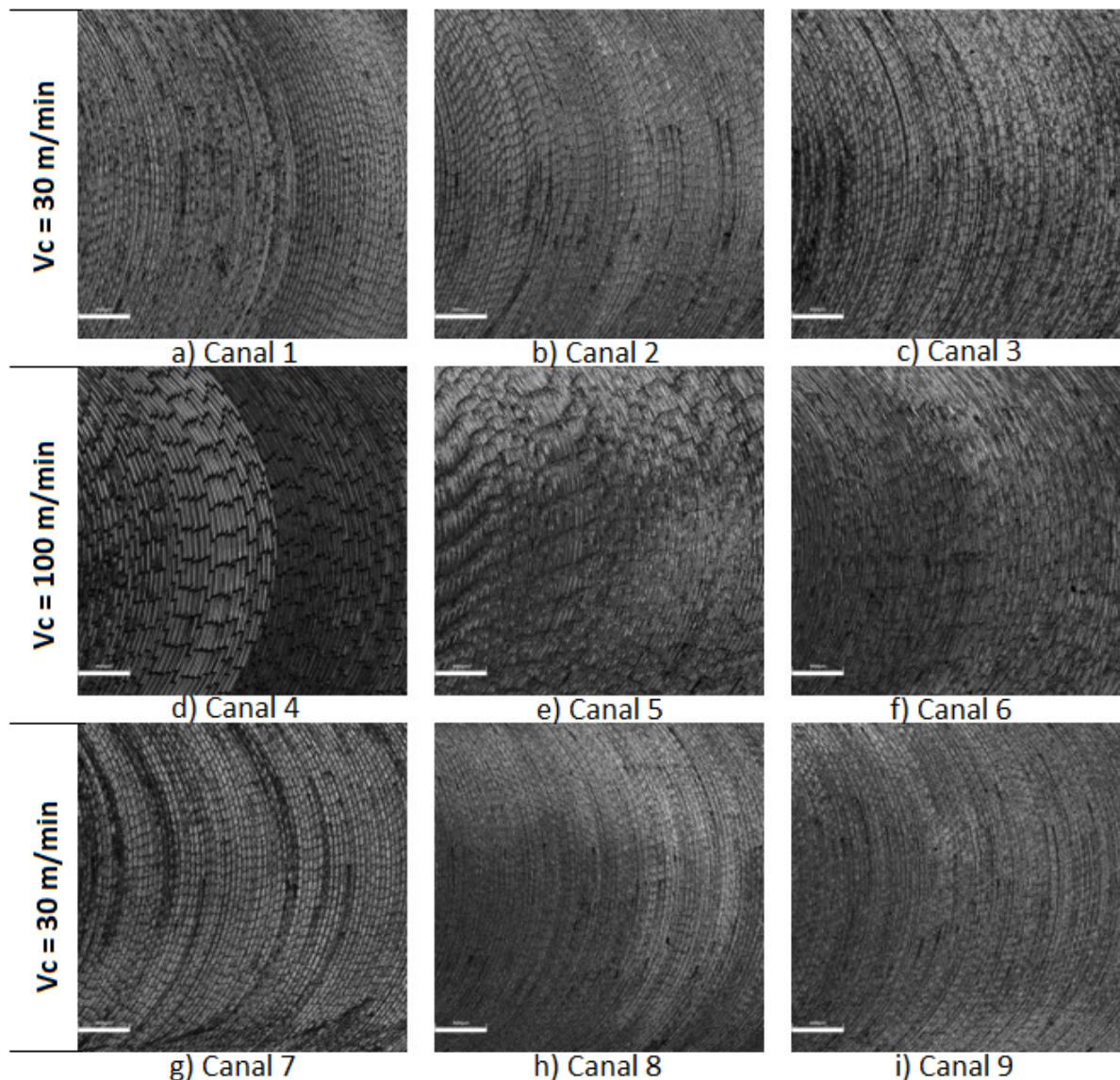


Figura 26: Imagem da superfície de Inconel 718 dos 9 canais com aumento de 5000 vezes.

Primeiro, foram fresados os canais 1, 2 e 3 com velocidade de corte igual a 30 m/min. Depois, foram fresados os canais 4, 5 e 6 com velocidade de corte igual a 100 m/min. E por fim, foram fresados os canais 7, 8 e 9, voltando para a velocidade de corte de 30 m/min. É perceptível pelas imagens apresentadas na figura 26 que os canais fresados com a menor velocidade de

corte aparenta ter um melhor acabamento superficial do que os canais fresados com a maior velocidade de corte. As marcas deixadas pela fresa são aparentemente maiores nos canais 4, 5 e 6, contribuindo para os maiores valores de rugosidade medidos em relação aos demais canais.

Durante análise da superfície da peça no microscópio, com o uso da lente de aumento de 5000 vezes, foi possível observar uma pequena vibração nas marcas de corte da fresa, ao decorrer de toda a superfície dos canais. Foi utilizada a lente de aumento de 20000 vezes para observar mais de perto as marcas de vibrações na superfície indicadas pelas setas verdes, como podem ser observadas nas figuras 27 e 28. Apesar das duas figuras possuírem a mesma escala, as marcas de vibrações se diferem de uma imagem para outra, por causa das diferentes velocidades de corte aplicadas em cada canal.

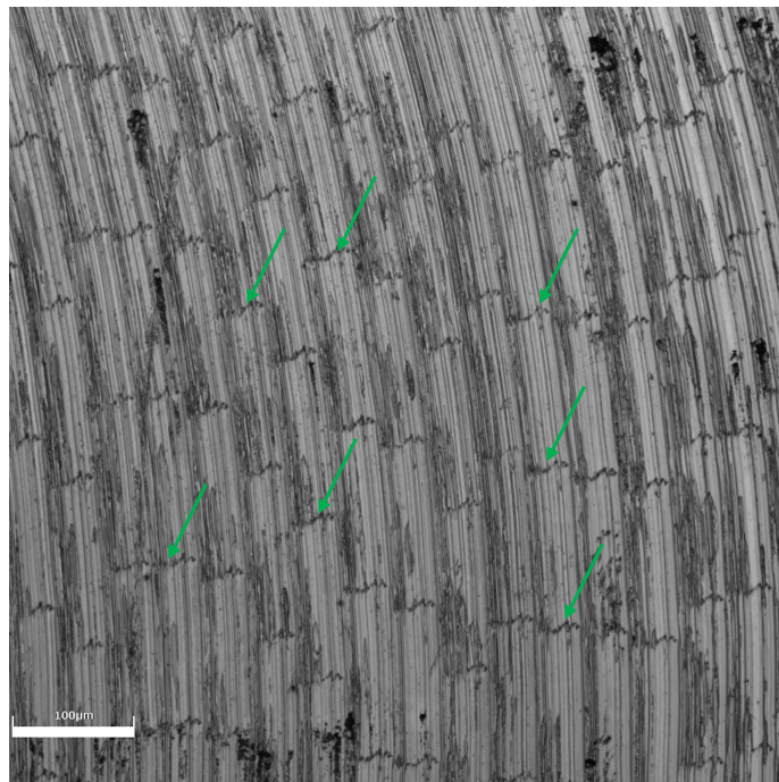


Figura 27: Marcas de vibração no canal 2 ($v_c = 30m/min$) com aumento de 20000 vezes.

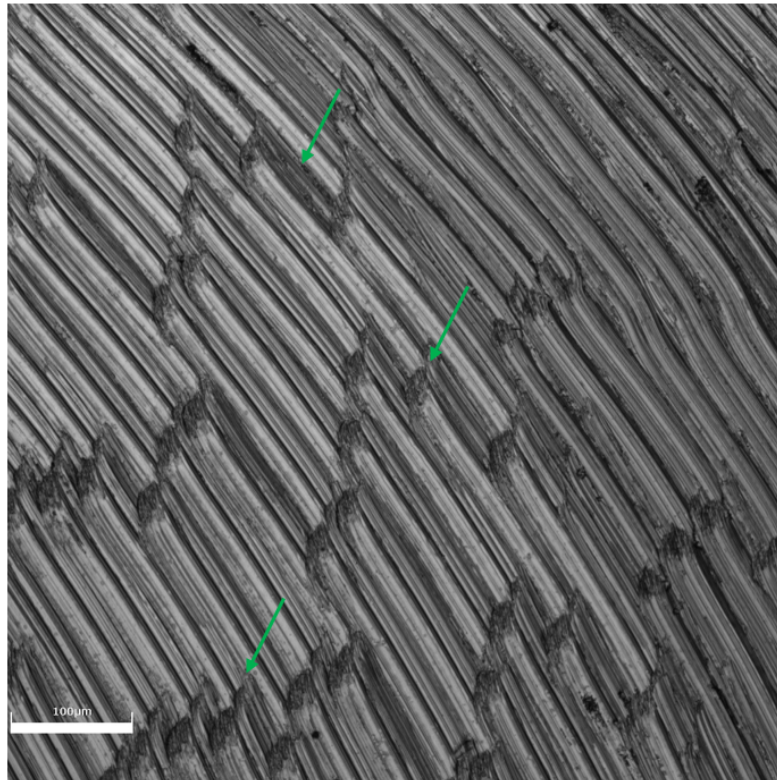


Figura 28: Marcas de vibração no canal 4 ($v_c = 100m/min$) com aumento de 20000 vezes.

As vibrações regenerativas, conhecidas como *chatter*, é um dos maiores problemas do processo de fresamento de topo (MIRRES; ARAUJO; AGUIAR, 2014).Dentre as possíveis causas das marcas de vibração nas superfícies fresadas estão a rigidez da máquina (centro de usinagem vertical VEGA XH7132) ou o sistema de fixação da ferramenta. A rigidez da máquina está ligada com seus eixos de movimento, elos e juntas, ou seja, com sua parte estrutural, podendo ser a origem das marcas de vibração. O sistema de fixação da ferramenta na máquina utiliza uma pinça, um cone e ar comprimido. O encaixe e aperto da pinça no cone é feito manualmente, podendo ter folgas e gerar vibrações caso não seja realizado de forma adequada.

Mirres, Araujo e Aguiar (2014) concluiu em seu estudo, utilizando sinais de deslocamento, sinais de forças de usinagem, medidas de rugosidade e verificação do aspecto da peça, que o aumento da profundidade de corte induziu o aparecimento do fenômeno *chatter*. Apesar dos parâmetros de corte e do material do corpo de prova (alumínio) utilizados pelo autor serem diferentes dos utilizados neste trabalho, é possível observar que o fenômeno *chatter* interfere nos resultados da rugosidade (R_a), sendo esse parâmetro um possível identificador desse fenômeno.

Também durante a análise superficial da peça foi observado a presença de carbonetos em sua superfície. Esses carbonetos possuem uma dureza superior a dureza do material e acabam por interferir no processo de fresamento. A fresa, ao passar por esses carbonetos, tem uma maior dificuldade para realizar o corte e, conseqüentemente, fica sujeita a sofrer maiores desgastes. Nas figuras 29 e 30 é possível observar os carbonetos circulosados em vermelho e as marcas ocasionadas quando a fresa usina uma região com presença de carbonetos, indicadas pelas setas amarelas.

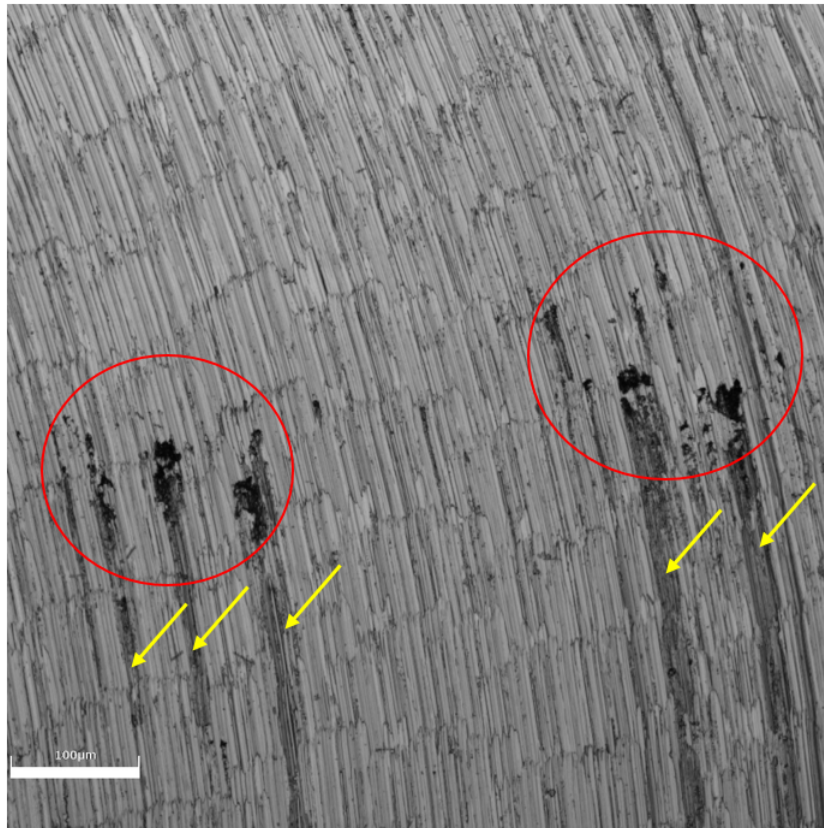


Figura 29: Carbonetos fresados no canal 2 ($v_c = 30m/min$) com aumento de 20000 vezes.

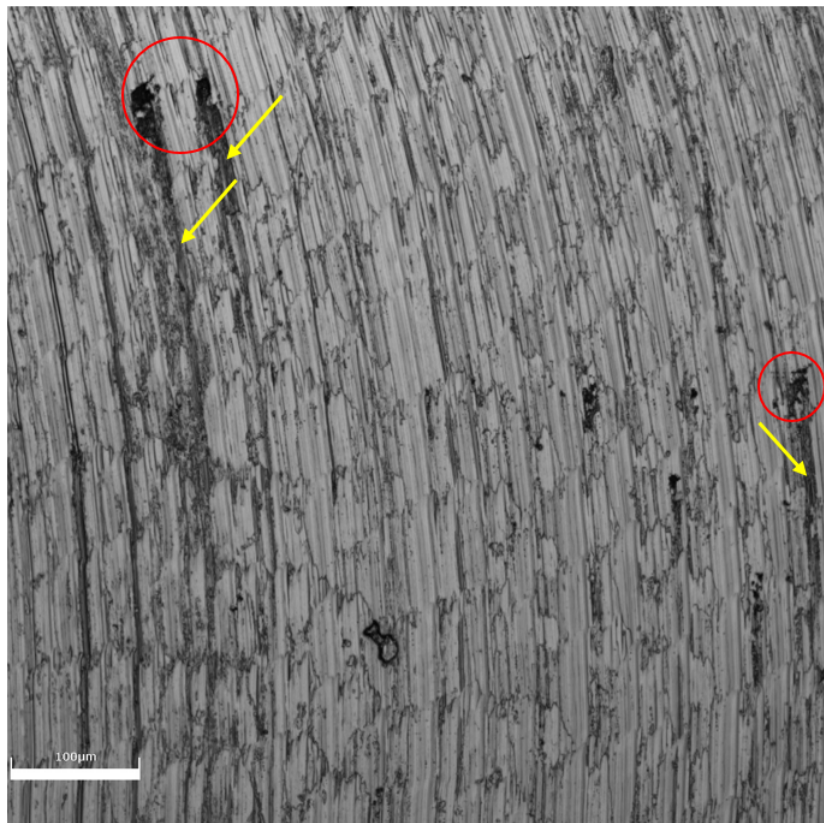


Figura 30: Carbonetos fresados no canal 7 ($v_c = 30m/min$) com aumento de 20000 vezes.

Oliveira (2017), ao analisar a microestrutura do Inconel 718, encontrou carbonetos e estruturas do tipo "Laves", que são correntes de precipitados, presentes no Inconel 718. A presença de carbonetos é algo comum na microestrutura do Inconel 718 e interfere no processo de usinagem, podendo causar maiores desgastes da ferramenta de corte.

4.1.3 Rugosidade

A medição de rugosidade foi realizada de acordo com as normas estabelecidas, conforme apresentado na metodologia. Foram realizadas 5 medições em cada canal, com o objetivo de analisar todo o comprimento do mesmo. Os resultados das medições do desvio aritmético médio (R_a), do desvio médio quadrático (R_q) e da altura máxima do perfil (R_z) estão apresentados em forma de gráficos nas figuras 31, 32 e 33, respectivamente. Os gráficos contêm os valores médios das medições e o desvio padrão para cada canal, além de mostrar a velocidade de corte utilizada no processo.

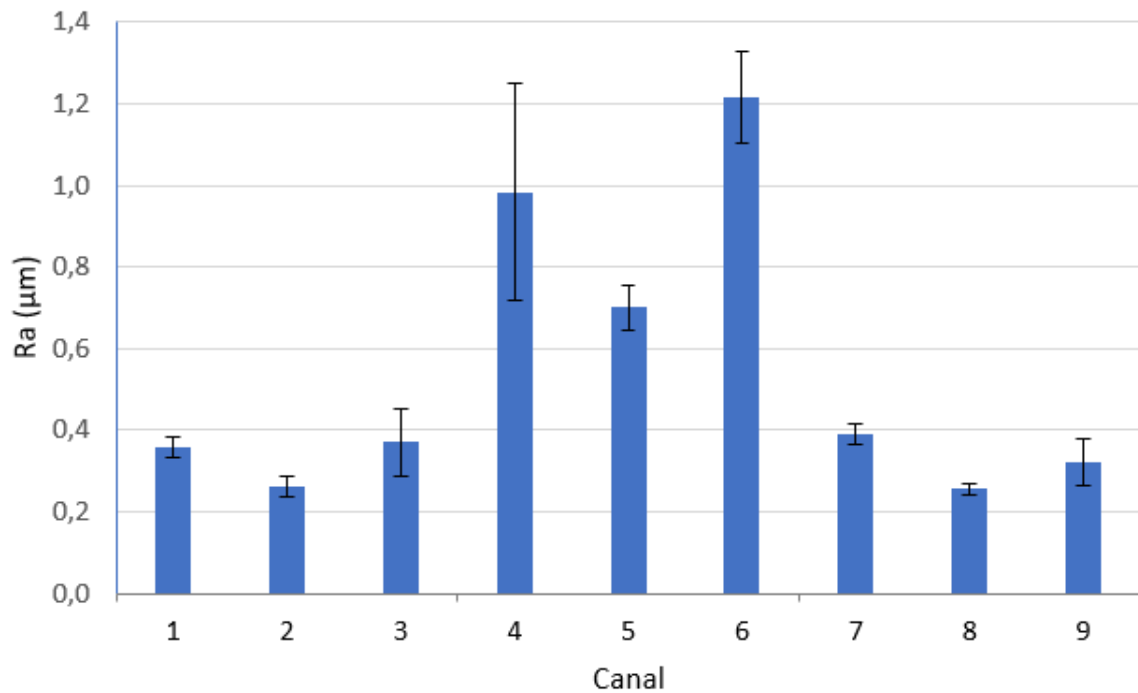


Figura 31: Desvio aritmético médio (R_a).

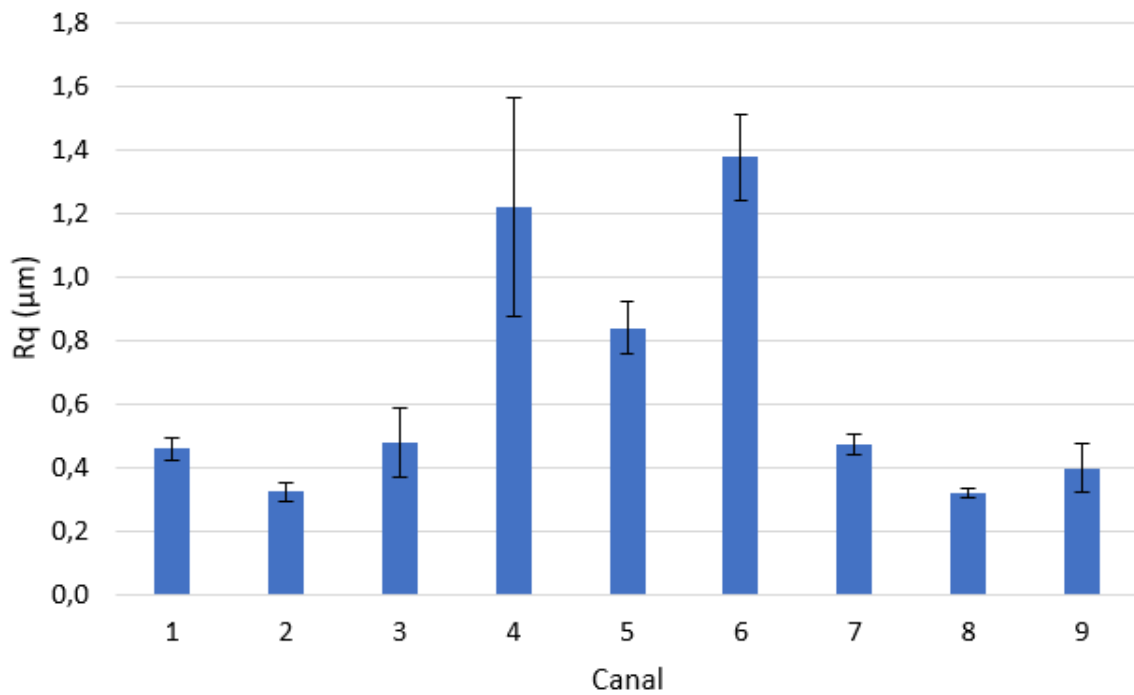


Figura 32: Desvio médio quadrático (R_q).

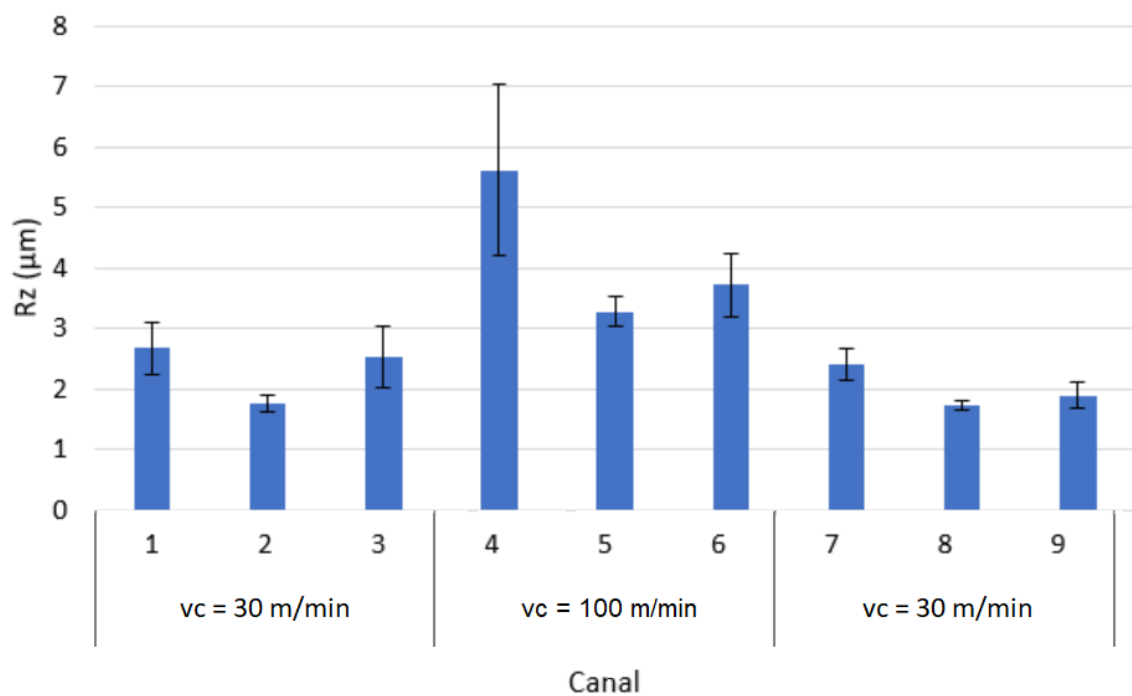


Figura 33: Altura máxima do perfil (R_z).

Os mesmos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q e R_z) foram medidos na superfície da peça, onde posteriormente foram usinados os canais. Assim como para os canais, foram realizadas 5 medições na superfície para se obter a média e o desvio padrão. O resultado da rugosidade superficial da peça pode ser visto no gráfico da figura 34.

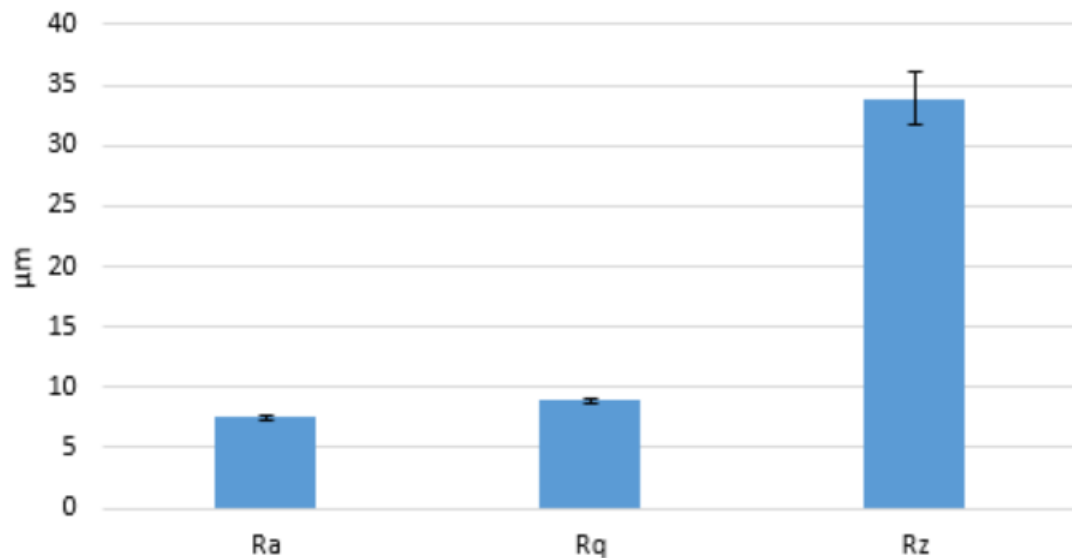


Figura 34: R_a , R_q e R_z na superfície da peça.

A partir dos dados apresentados nos gráficos, é possível perceber que a superfície dos canais apresentaram valores de rugosidade muito menores do que a superfície da peça. O canal 8, fresado com velocidade de corte igual a 30 m/min, apresentou as menores médias de rugosidade encontradas ($R_a = 0,256 \mu m$, $R_q = 0,318 \mu m$ e $R_z = 1,726 \mu m$). Já para a superfície da peça, a média dos valores de rugosidade encontrados foram $R_a = 7,548 \mu m$, $R_q = 8,904 \mu m$ e $R_z = 33,905 \mu m$. A fresa de metal duro revestida com TiAlN conseguiu obter um bom acabamento superficial e baixos valores de rugosidade, mantendo a integridade superficial da peça de Inconel 718. Os valores de R_a , R_q e R_z , para ambas velocidades de corte, estão apresentados na tabela 18.

Tabela 18: Resultados da média de R_a , R_q e R_z em cada canal

Canal	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)
1 ($v_c = 30m/min$)	0,360	0,458	2,664
2 ($v_c = 30m/min$)	0,262	0,324	1,768
3 ($v_c = 30m/min$)	0,370	0,478	2,528
4 ($v_c = 100m/min$)	0,984	1,220	5,614
5 ($v_c = 100m/min$)	0,700	0,838	3,272
6 ($v_c = 100m/min$)	1,216	1,378	3,716
7 ($v_c = 30m/min$)	0,390	0,474	2,394
8 ($v_c = 30m/min$)	0,256	0,318	1,726
9 ($v_c = 30m/min$)	0,320	0,398	1,886

De acordo com a classe de rugosidade apresentada na Tabela 19 (NBR, 1984), os canais fresados com velocidade de corte igual a 30 m/min obtiveram uma classificação N 5. Já os canais fresados com velocidade de corte igual a 100 m/min obtiveram uma classificação N7. Todos os canais, independente da velocidade de corte, ficaram com uma classificação melhor do que a superfície da peça (N 10).

Tabela 19: Características da rugosidade R_a . Adaptado de NBR 8404 (NBR, 1984).

Classe de rugosidade	Desvio médio aritmético R_a (μm)
N 12	50
N 11	25
N 10	12,5
N 9	6,3
N 8	3,2
N 7	1,6
N 6	0,8
N 5	0,4
N 4	0,2
N 3	0,1
N 2	0,05
N 1	0,025

Os resultados mostraram que a velocidade de corte (30 m/min) mais baixa obteve menores valores de rugosidade, comparado com a velocidade de corte mais alta (100 m/min). Esses resultados eram esperados, uma vez que o processo com menor velocidade de corte é o menos agressivo, já que os outros parâmetros de corte são mantidos constantes. Além disso, os resultados encontrados de R_a e R_z utilizando velocidade de corte igual a 30 m/min, apresentados na tabela 18, foram um pouco melhores do que os resultados encontrados por Giacobbo (2021), apesar dos diferentes parâmetros de corte utilizados, que obteve $R_a = 0,55 \pm 0,26 \mu\text{m}$ e $R_z = 3,18 \pm 1,69 \mu\text{m}$, para as amostras usinadas com ferramenta de metal duro, e $R_a = 0,57 \pm 0,28 \mu\text{m}$ e $R_z = 3,00 \pm 1,02 \mu\text{m}$, utilizando ferramentas de cerâmica.

Favaro-Filho (2018) analisou o desvio aritmético médio (R_a) ao longo da vida da ferramenta e o relacionou com a variação de temperatura para cada condição de usinagem utilizada. Os resultados de rugosidade apresentados por Favaro-Filho (2018) para fresamento concordante, em que R_a ficou abaixo de $2 \mu\text{m}$ para as condições de cortes mais severas e abaixo de $1 \mu\text{m}$ para condições mais brandas, foram bem próximos dos resultados obtidos neste trabalho (Tab. 18), onde é possível observar um aumento do R_a ao aumentar a velocidade de corte.

4.2 Dureza

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza estão apresentados em forma de gráfico na figura 35. O inonel 718, na condição solubilizada, apresenta um valor teórico de dureza de 212 HB. O resultado de dureza inicial obtido foi de aproximadamente 209 HB, bem próximo do valor teórico. Os resultados de dureza medidos nos canais feitos com velocidade de corte igual a 30 m/min (entre 202,167 e 209,267 HB) ficaram próximos do valor teórico e do valor medido inicialmente, considerando o desvio padrão, o que era esperado devido à capacidade do Inonel 718 manter suas propriedades mecânicas mesmo em elevadas temperaturas, o que inclui sua dureza. Por sua vez, os valores de dureza medidos nos canais produzidos com velocidade de corte de 100 m/min (entre 213,567 e 220,267 HB) foram levemente superiores ao valor teórico e ao valor medido inicialmente. Isso ocorre devido às maiores temperaturas atingidas com o

aumento da velocidade de corte, que causou um leve encruamento da superfície fresada.

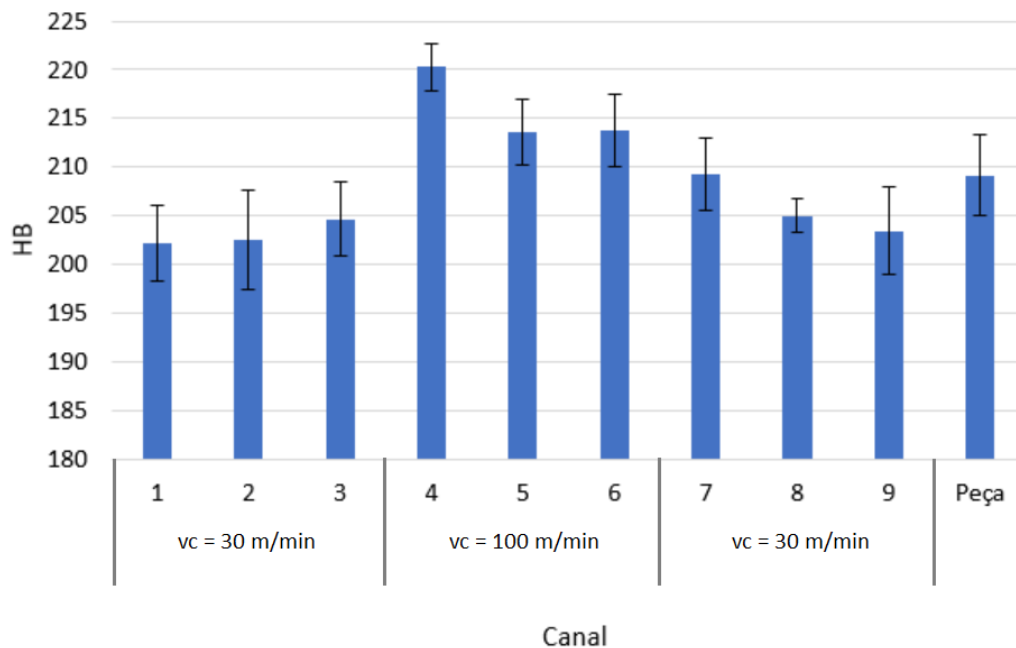


Figura 35: Dureza Brinell dos canais fresados e da peça de Inconel 718 solubilizado.

Em seus estudos, Xavier, Duchosal e Jeyapandiarajan (2018) observaram que o efeito de encruamento no processo de torneamento de Inconel 718 está relacionado com a velocidade de corte, a ferramenta de corte e com a condição de corte (seco, MQL ou convencional). O valor mais baixo de dureza encontrado por Xavier, Duchosal e Jeyapandiarajan (2018) foi de 303,1 HV ($v_c = 60$ m/min, condição de corte seco e ferramenta de cerâmica) e o valor mais alto foi de 435,9 HV ($v_c = 100$ m/min, condição de corte convencional e ferramenta de carboneto). Assim como o observado neste trabalho, o aumento da velocidade de corte proporcionou uma elevação na dureza da superfície usinada, de 395,9 HV ($v_c = 60$ m/min) para 435,9 HV ($v_c = 100$ m/min), utilizando condição de corte convencional e ferramenta de carboneto em ambos os casos.

4.3 Considerações Finais

O uso do Inconel 718 tende a crescer, à medida que as indústrias aeroespacial, automotiva e petrolífera avançam tecnologicamente. Isso deve ao fato das ligas à base de níquel, como o Inconel 718, serem ligas termorresistentes com importantes aplicações. Contudo, essas ligas possuem baixa usinabilidade, fazendo com que ainda haja grande demanda no estudo do fresamento dessas ligas.

A maioria dos autores que estudam o fresamento de Inconel 718 utilizam fluido de corte para aumentar a lubrificação e diminuir as temperaturas atingidas durante o corte, com o objetivo de se obter uma melhor integridade superficial da peça usinada e um menor desgaste da ferramenta de corte. As ferramentas de metal duro revestidas se destacam pelo bom resultado e preço acessível, fazendo com que tenha um melhor custo-benefício comparado com outros ma-

teriais de ferramenta. E os parâmetros de corte que mais interferem no fresamento de Inconel 718, segundo os autores pesquisados, são a velocidade de corte e o avanço por dente.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

A partir da realização deste trabalho é possível concluir que:

- i. Não houve formação de trincas ocasionadas pelas elevadas temperaturas atingidas e pelo ciclo térmico ocorrido durante fresamento, mesmo com o aumento da velocidade de corte;
- ii. Os valores de rugosidade mais baixos ($R_a = 0,256 \mu m$, $R_q = 0,318 \mu m$ e $R_z = 1,726 \mu m$) foram encontrados nos canais fresados com velocidade de corte igual a 30 m/min, por ser menos agressivo que o fresamento com velocidade de corte igual a 100 m/min;
- iii. A fresa de metal duro revestida com TiAlN conseguiu valores de rugosidade dentro dos padrões para o processo de fresamento;
- iv. O fresamento com velocidade de corte igual a 100 m/mm causou um leve encruamento da superfície, ocasionando um aumento máximo de 5,3% da dureza na região fresada em relação com a superfície da peça;
- v. Foi detectada a presença do fenômeno *chatter* nas superfícies dos canais fresados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- i. Estudar a interferência da rigidez da máquina e do sistema de fixação nas marcas de vibração na superfície usinada;
- ii. Realizar um estudo de prevenção de *chatter* no processo de fresamento, correlacionando o aparecimento das vibrações com o desvio aritmético médio (R_a) e com a profundidade de corte (a_p);
- iii. Analisar o desgaste e a vida útil da ferramenta de metal duro revestido com TiAlN no fresamento de Inconel 718.

REFERÊNCIAS

- ALAUDDIN, M.; BARADIE, M. A. E.; HASHMI, M. S. J. Optimization of surface finish in end milling inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, Science Direct, v. 56, p. 54–65, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- ASM. *Properties and selection - Nonferrous alloys and special-purpose materials*. 10. ed. [S.l.]: ASM International, 1990. v. 2. 3470 p. Citado na página 5.
- ASPINWALL, D. K.; SOO, S. L.; CURTIS, D. T.; MANTLE, A. L. Profiled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy. *Annals of the CIRP*, v. 56, p. 335–338, 2007. Citado na página 6.
- AXINTE, D. A.; DEWES, R. C. Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling-experimental data and empirical models. *Journal of Materials Processing Technology*, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00282-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00282-0), v. 127, p. 325–335, 2002. Citado na página 6.
- AZO, M. *FLEXT OLS4100 da Evidente*. 2022. <<https://www.azom.com/equipment-details.aspx?EquipID=3508>>. Acessado: 2022-05-12. Citado 2 vezes nas páginas iv e 40.
- BOZHONG, M. G. *Inconel 718/UNS N07718 sheet/bar/pipe*. 2019. <http://www.bzmetal.com/product_detail/inconel-718/uns-n07718-sheet/bar/pipe-15106279669339980.html>. Acessado: 2021-04-14. Citado 2 vezes nas páginas vii e 5.
- BQL. *BIO10e Óleo Solúvel Sintético Biodegradável*. 2021. <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3652-geracao-de-calor-e-distribuicao-de-temperaturas>. Acessado: 2021-07-23. Citado 3 vezes nas páginas viii, 37 e 38.
- CAMPBELL, F. C. *"Tool materials", Kirk-Otllumer Encyclopedia of Chemical Technology*. 1. ed. [S.l.]: Elsevier Science, 2006. 616 p. Citado 2 vezes nas páginas iii e 6.
- CELIK, A.; ALAGAÇ, M. S.; TURAN, S.; KARA, A.; KARA, F. Wear behavior of solid sialon milling tools during high speed milling of inconel 718. *Wear*, v. 378-379, p. 58–67, 2017. Citado 2 vezes nas páginas vii e 28.
- CIMM. *Geração de calor e distribuição de temperaturas*. 2021. <<https://biolub.com.br/oleos-soluveis-sinteticos/bio-100e>>. Acessado: 2021-09-23. Citado 2 vezes nas páginas iii e 17.
- DE-CHIFFRE, L.; LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; LUCCA, D. A.; GOCH, G.; BROWN, C. A.; RAJA, J.; HANSEN, H. N. Quantitative characterization of surface texture. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63458-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63458-1), v. 49, n. 2, p. 635–652, 2000. Citado 2 vezes nas páginas iv e 41.
- DE-CHIFRE, L. Industrial survey on iso surface texture parameters. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 48, n. 3, p. 74–77, 1999. Citado 2 vezes nas páginas iv e 41.

- DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; MAHIUDDIN, A. Effect of minimum quantity lubrication (mql) on tool wear and surface roughness in turning aisi-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022>., v. 172, p. 299–304, 2006. Citado na página 20.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo: mm Editora, 2000. 243 p. Citado 10 vezes nas páginas 9, 10, 11, 14, 15, 19, 20, 25, 27 e 28.
- DIRECT, I. *Durômetro universal ZHU 250*. 2022. <<https://www.directindustry.com/pt/prod/zwickroell-gmbh-co-kg/product-15660-1100157.html>>. Acessado: 2022-05-12. Citado 2 vezes nas páginas iv e 42.
- DORMER, P. *Fresamento 2021-2022*. 2021. <https://www.dormerpramet.com/br/pt_BR/downloads-catalogs>. Acessado: 2022-05-12. Citado 3 vezes nas páginas iv, vii e 37.
- DUDZINSKI, D.; DEVILLEZ, A.; MOUFKIA, A.; LARROUQUÈRE, D.; ZERROUKI, V.; VIGNEAU, J. A review of developments towards dry and high speed machining of inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00159-7), v. 44, p. 439–456, 2004. Citado na página 6.
- EZUGWU, E.; WANG, Z. M.; MACHADO, A. R. The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 86, n. 1, p. 1–16, 1999. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698003148>>. Citado 3 vezes nas páginas 1, 4 e 22.
- EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *superalloys. International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Science Direct, v. 45, p. 1353–1367, 2005. Citado 5 vezes nas páginas iii, 22, 23, 24 e 25.
- FAVARO-FILHO, A. Fresamento de topo do inconel 718 com ferramentas de metal duro microgrãos. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia - MG*, 2018. Citado 8 vezes nas páginas iii, vii, 1, 23, 28, 31, 32 e 52.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1970. Citado 6 vezes nas páginas iii, 9, 10, 14, 17 e 28.
- FINKELDEI, D.; SEXUAUER, M.; BLEICHER, F. End milling of inconel 718 using solid si₃n₄ ceramic cutting tools. *Procedia CIRP*, v. 81, p. 1131–1135, 2019. Citado 3 vezes nas páginas vii, 28 e 29.
- GGD, M. *Alumínio 7075-T651*. 2021. <<https://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2020/07/GGD-7075-t651-Alum%C3%ADnio.pdf>>. Acessado: 2021-04-16. Citado 2 vezes nas páginas vii e 5.
- GIACCOBO, L. O. Avaliação comparativa do desempenho de ferramentas de metal-duro e cerâmica no fresamento do inconel 718. *Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 2021. Citado 5 vezes nas páginas vii, 28, 31, 44 e 52.
- HALIM, N. H. A.; HARONA, C. H. C.; GHANIA, J. A.; AZHAR, M. F. Tool wear and chip morphology in high-speed milling of hardened inconel 718 under dry and cryogenic co₂ conditions. *Wear*, Science Direct, v. 426-427, p. 1683–1690, 2019. Citado 3 vezes nas páginas vii, 29 e 30.
- HOLMBERG, J.; WRETLANDC, A.; BERGLUNDA, J.; BENO, T. A detailed investigation of residual stresses after milling inconel 718 using typical production parameters for assessment of

- affected depth. *Materials Today Communications*, Science Direct, v. 24, p. 1–12, 2020. Citado 2 vezes nas páginas vii e 29.
- ISO. 4287. *Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade*. 2002. Citado na página 41.
- ISO. 1832. *Pastilhas intercambiáveis para ferramentas de corte - Designação*. 2019. Citado 2 vezes nas páginas vii e 27.
- ISO. 6501-1. *Materiais metálicos - Ensaio de dureza Brinell - Parte 1: Método de Ensaio*. 2019. Citado na página 42.
- KLOCKE, F. *Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping*. Berlin: Springer, 2009. 433 p. Citado na página 19.
- KLOCKE, F.; KLINK, A.; VESELOVAC, D.; ASPINWALL, D. K.; SOO, S. L.; SCHMIDT, M.; SCHILP, J.; LEVY, G.; KRUTH, J.-P. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, p. 703–726, 2014. Citado na página 5.
- KLOCKE, F.; SOO, S. L.; KARPUSCHEWSKI, B.; WEBSTER, J. A.; NOVVIC, D.; EL-FIZY, A.; AXINTE, D. A.; TONISSEN, S. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, p. 581–604, 2015. Citado na página 6.
- KOMANDURI, R. "Tool materials", *Kirk-Otflumer Encyclopedia of Chemical Technology*. 4. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1997. Citado 2 vezes nas páginas iii e 25.
- KURSUNCU, B. Influence of cryogenic heat-treatment soaking period and temperature on performance of sintered carbide cutting tools in milling of inconel 718. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v. 92, p. 105323, 2020. Citado 2 vezes nas páginas vii e 28.
- LISBOA, F. C. D.; MORAIS, J. J. B. de; HIRASHITA, M. A. Fluidos de corte: Uma abordagem geral e novas tendências. In: *XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*. Salvador, Brasil: [s.n.], 2013. p. 1–16. Citado na página 21.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, D. M. B. *Teoria da usinagem dos materiais*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 408 p. Citado 14 vezes nas páginas iii, vii, 1, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 17, 19, 24, 25 e 26.
- MADRAS. *Super CNC Vertical Machining Centre (XH7132)*. 2022. <www.mtt.net.in>. Acessado: 2022-05-12. Citado 2 vezes nas páginas vii e 36.
- MCLANE. *Centro de maquinado Vertical XH7132*. 2022. <<https://mclane.mx/producto/maquina-cnc/centro-de-maquinado/centro-de-maquinado-vertical/>>. Acessado: 2022-05-12. Citado 2 vezes nas páginas iv e 36.
- MIRRES, S. P.; ARAUJO, A. C.; AGUIAR, R. A. A. Análise de diferentes sinais experimentais durante chatter no fresamento de topo. Uberlândia, p. 1–11, 2014. Citado na página 47.
- MITSUBISHI, M. *Desgastes e danos em ferramenas*. 2021. <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/wear.html>. Acessado: 2021-07-23. Citado 2 vezes nas páginas vii e 18.
- NBR. 8404. *Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos - Procedimento*. 1984. Citado 3 vezes nas páginas viii, 51 e 52.

- NORTON, R. L. *Projeto de Máquinas*. 4. ed. Porto Alegre: BOOKMAN EDITORA, 2011. 1030 p. Citado 2 vezes nas páginas vii e 5.
- OLIVEIRA, A. R. F.; TEXEIRA, I. C.; MACHADO, A. R. Estudo da integridade superficial da liga de inonel 718 fresada com ferramenta de metal duro em diferentes condições de desgaste. In: *Anais do 25º POSMEC - Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica*. Uberlândia - MG, Brasil: [s.n.], 2015. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas vii e 28.
- OLIVEIRA, D. D. Retificação de inonel 718 com multicamadas de grafeno dispersas em fluido de corte aplicado via técnica mql. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia - MG*, 2017. Citado 5 vezes nas páginas iii, 20, 21, 23 e 49.
- OZEL, T.; ALTAN, T. Process simulation using finite element method - prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high speed flat end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 40, p. 713–738, 2000. Citado na página 17.
- PEREIRA, O.; CELAYA, A.; URBICAÍN, G.; RODRIGUEZ, A.; FERNANDEZ-VALDIVIELSO, A.; LACALLE, L. N. L. Co2 cryogenic milling of inonel 718: cutting forces and tool wear. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, p. 8459–8468, 2020. Citado 4 vezes nas páginas vii, 28, 30 e 31.
- RIBEIRO, J. L. S.; ABRÃO, A. M.; SALES, W. F. Forças de usinagem no fresamento de aços para matrizes. In: *Anais do 16º POSMEC - Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica*. Uberlândia - MG, Brasil: [s.n.], 2006. p. 1–10. Citado 3 vezes nas páginas iii, 14 e 15.
- RIGATTI, A. M. Y. Avaliação da força de usinagem e energia específica de corte no fresamento com alta velocidade de corte. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira*, 2010. Citado na página 14.
- SANCHEZ, J. A.; POMBO, I.; ALBERDI, R.; IZQUIERDO, B.; PLAZA, S.; MARTINEZ-TOLEDANO, J. Machining evaluation of a hybrid mql-co2 grinding technology. *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.002>, v. 18, p. 1840–1849, 2010. Citado 3 vezes nas páginas iii, 20 e 21.
- SEG, I. *LOCAÇÃO DE RUGOSÍMETRO MITUTOYO MODELO SJ-201*. 2022. <<https://www.seginstrumentos.com.br/locacao/locacao-de-rugosimetro-mitutoyo-modelo-sj-201>>. Acessado: 2022-05-12. Citado 2 vezes nas páginas iv e 40.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. *Projeto de Engenharia Mecânica*. 7. ed. Porto Alegre: BOOKMAN EDITORA, 2005. 960 p. Citado 2 vezes nas páginas vii e 5.
- SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2012.02.002>, v. 57, p. 83–101, 2012. Citado na página 20.
- SHOKRANI, A.; NEWMAN, S. T. Hybrid cooling and lubricating technology for cnc milling of inonel 718 nickel alloy. *Procedia CIRP*, v. 77, p. 215–218, 2018. Citado 3 vezes nas páginas vii, 28 e 30.
- SOUZA, U. B. Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica. *Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia - MG*, 2007. Citado 2 vezes nas páginas iii e 10.
- STEMMER, C. E. *Ferramentas de Corte I*. 3. ed. Florianópolis: EDITORA DA UFSC, 1993. 249 p. Citado 2 vezes nas páginas iii e 13.

- SUAREZ, M. P. Fresamento de canais da liga de alumínio aeronáutico 7075-t7. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia - MG*, 2008. Citado na página 18.
- SUGAHARA, T.; NETO, C. M.; REIS, D. A. P.; HIRSCHMANN, A. C. O.; NETO, F. P. Estudo do comportamento em fluência da superliga inconel 718. In: *15^o ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA - XV ENCITA*. São José dos Campos, Brasil: [s.n.], 2009. p. 1–6. Citado na página 4.
- SULAIMAN, S.; ROSHAN, A.; BORAZJABI, S. Effect of cutting parameters on cutting temperature of tial6v4 alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 10.4828/www.scientific.net/AMM.392.68., v. 392, p. 68–72, 2013. Citado 2 vezes nas páginas iii e 16.
- TORRES, L. F. L.; SILVA, G. D. P.; MENDONÇA, G. D.; OLIVEIRA, D. Principais características para a baixa usinabilidade do inconel 718 com foco no processo do fresamento. Diamantina (MG) UFVJM, p. 1–5, 2021. ISSN 2764-0582. Citado na página 1.
- TRENT, E. M. Metal cutting and the tribology of seizure: I seizure in metal cutting. *Wear*, v. 128, n. 1, p. 29–45, 1988. Citado na página 16.
- XAVIOR, M. A.; DUCHOSAL, A.; JEYAPANDIARAJAN, P. Experimental investigation on work hardening and residual stress during machining of inconel718. *materialstoday: proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.322>, v. 5, p. 13301–13308, 2018. Citado na página 53.
- ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; BORDIN, F. M.; COMIN, G. S. Integridade no fresamento com ferramentas submetidas a tratamento superficial. In: *Anais do VII CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. São Luís - MA, Brasil: [s.n.], 2012. p. 1–9. Citado 2 vezes nas páginas vii e 28.

APÊNDICE A - Imagens

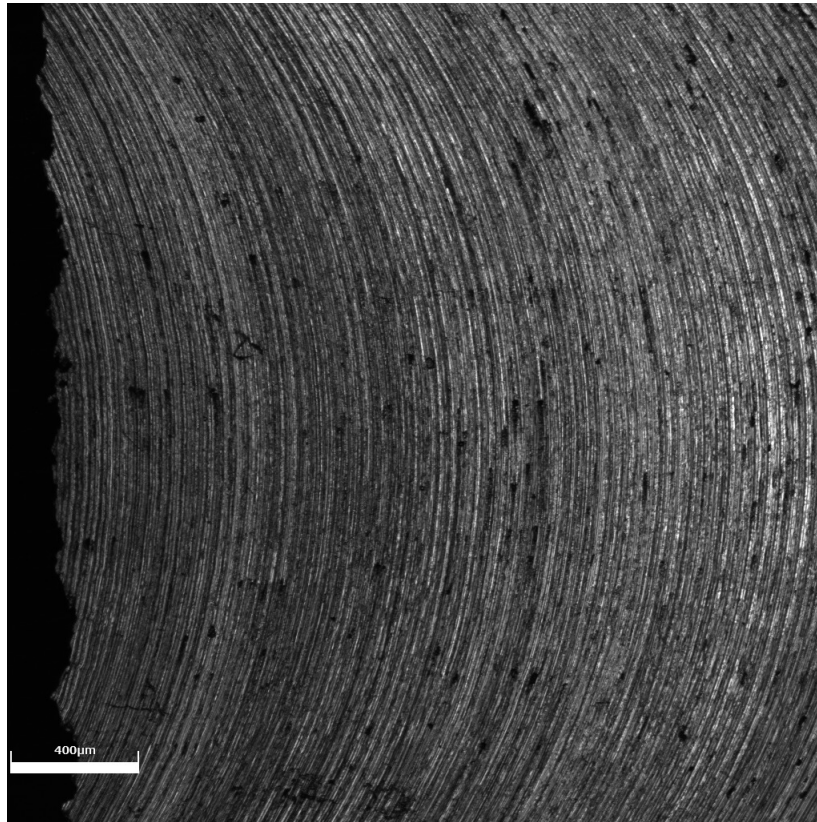


Figura 36: Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 1 com aumento de 5000 vezes.

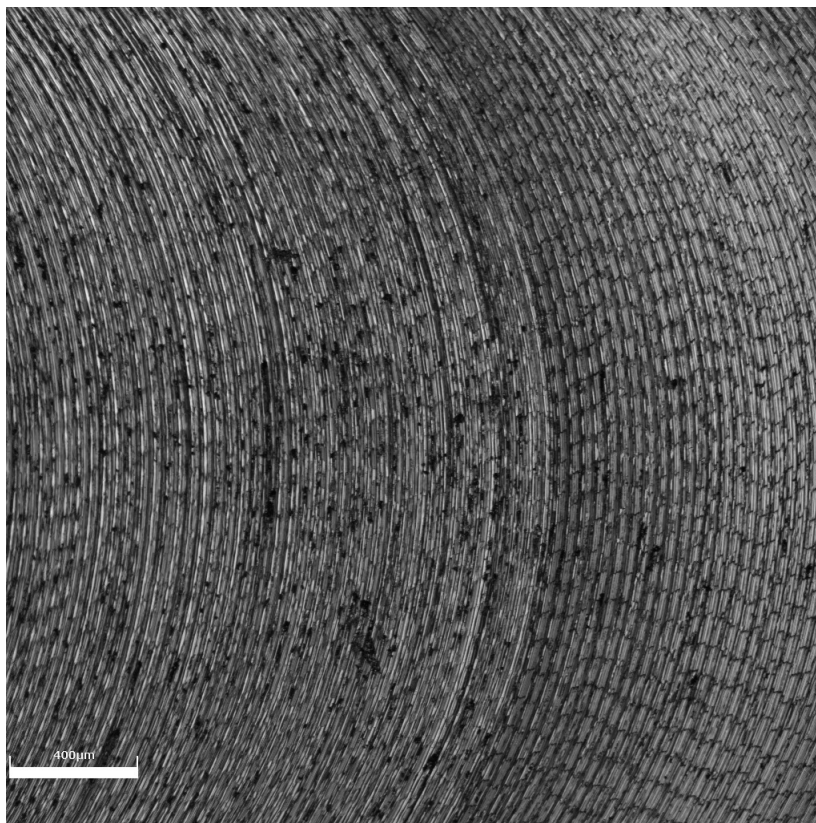


Figura 37: Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 1 com aumento de 5000 vezes.

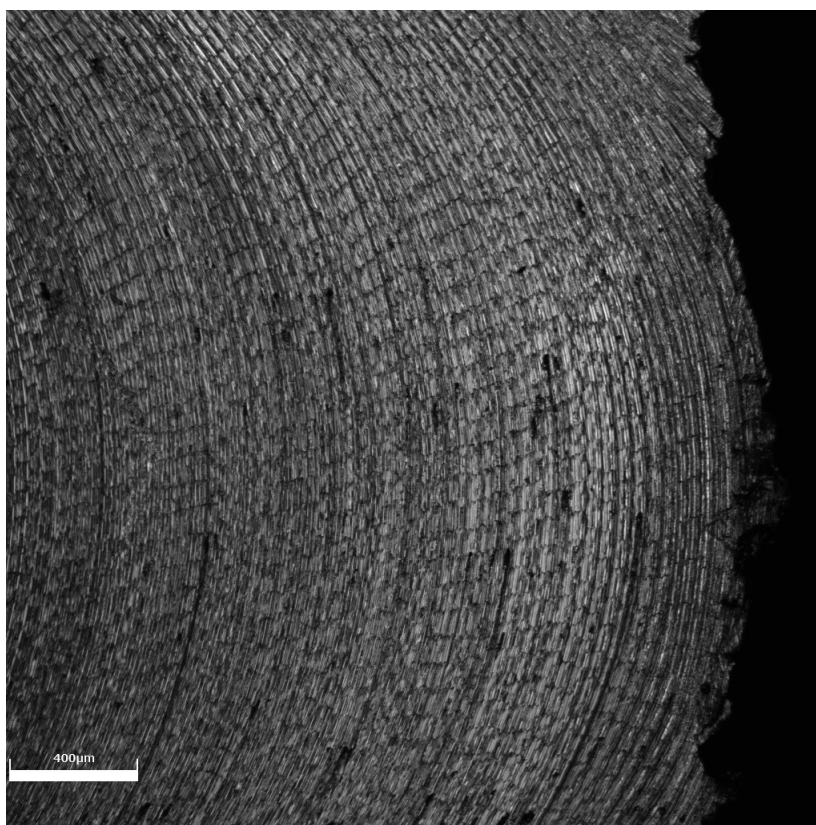


Figura 38: Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 1 com aumento de 5000 vezes.

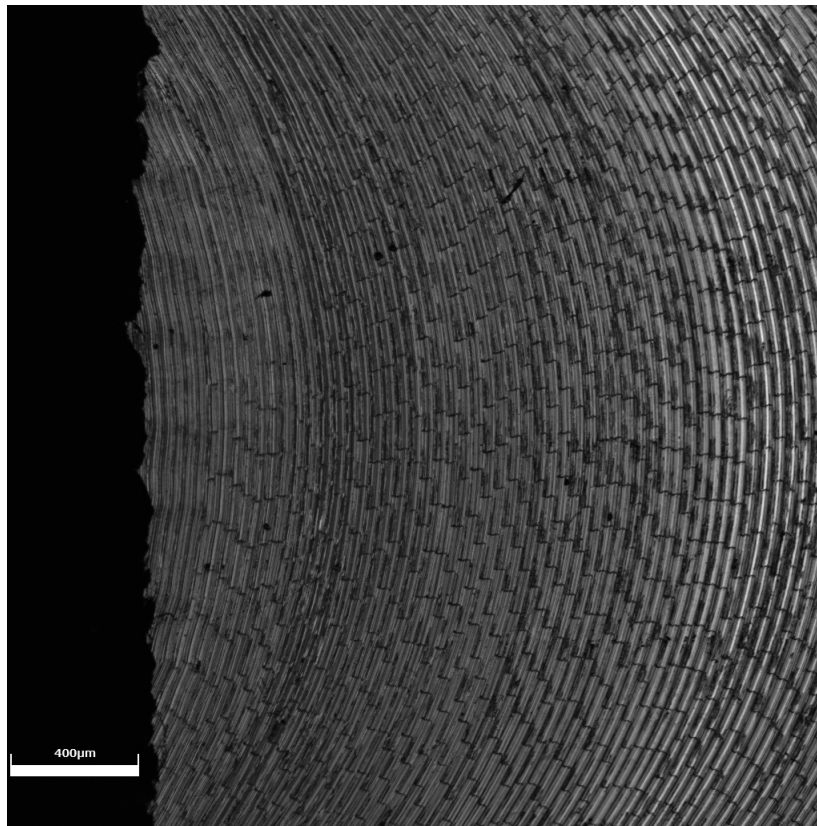


Figura 39: Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 2 com aumento de 5000 vezes.

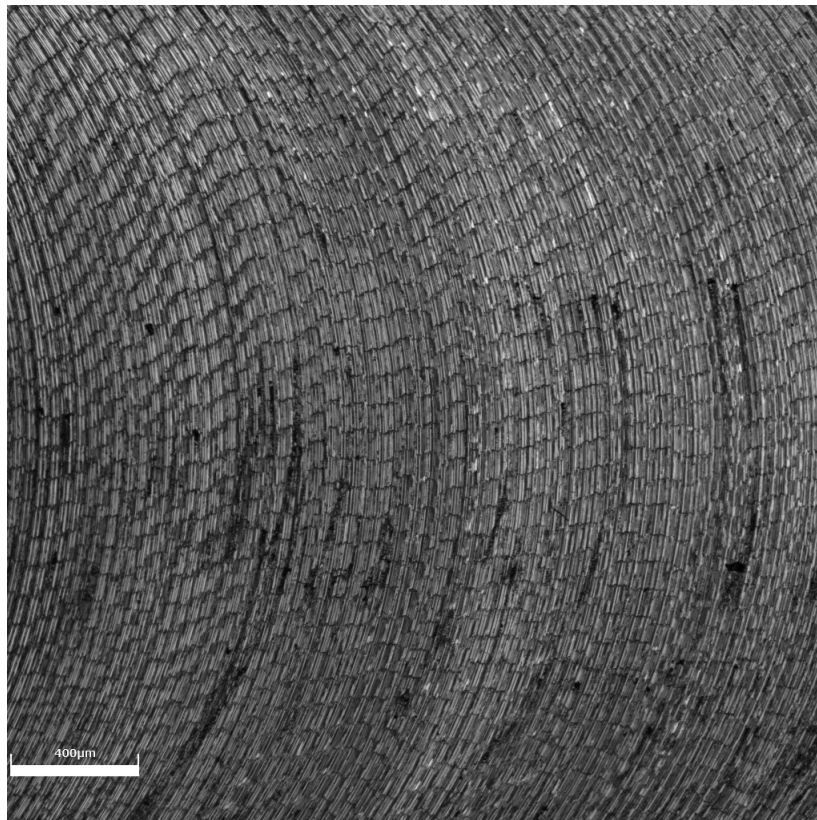


Figura 40: Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 2 com aumento de 5000 vezes.

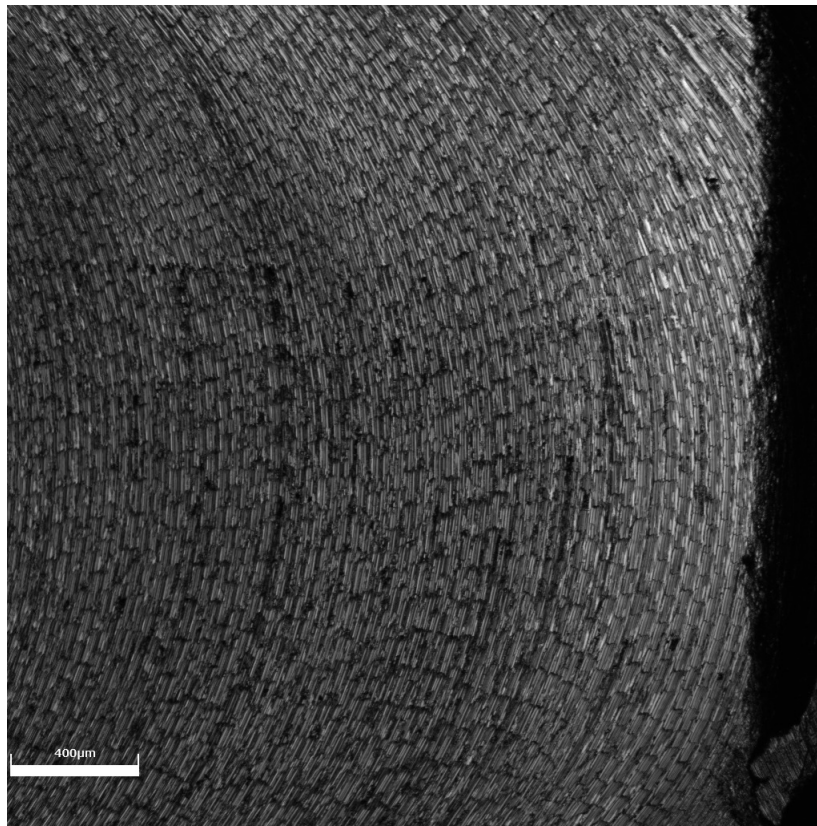


Figura 41: Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 2 com aumento de 5000 vezes.

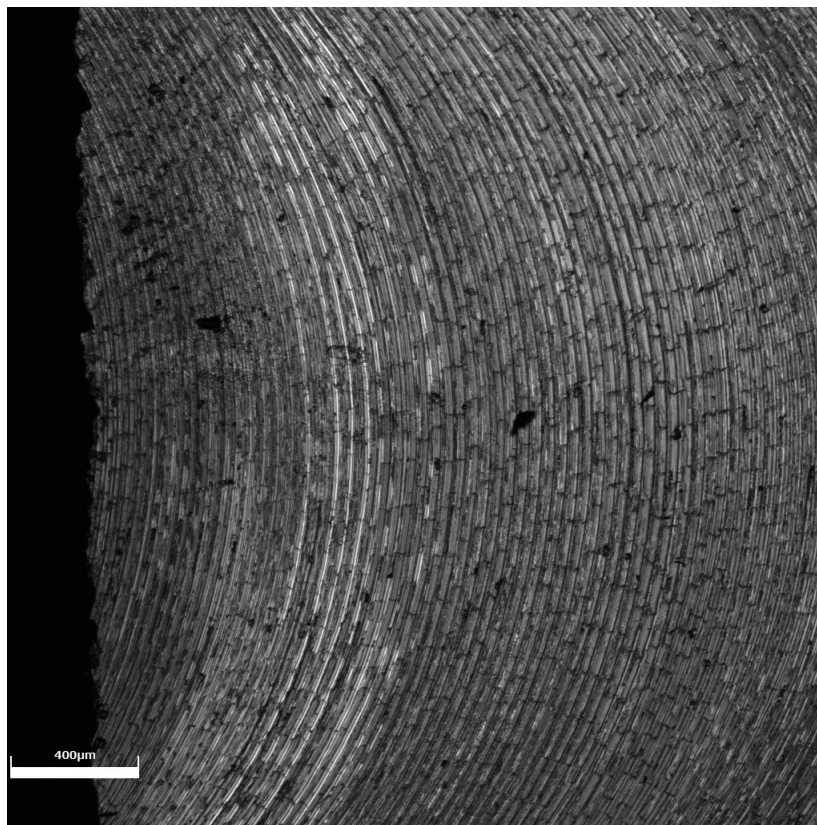


Figura 42: Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 3 com aumento de 5000 vezes.

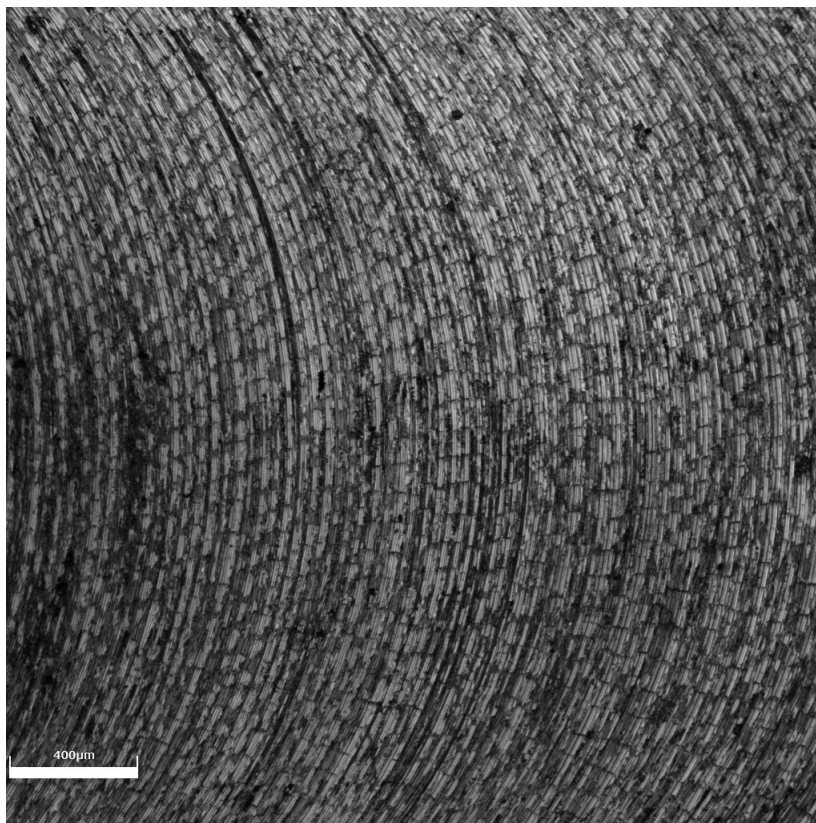


Figura 43: Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 3 com aumento de 5000 vezes.

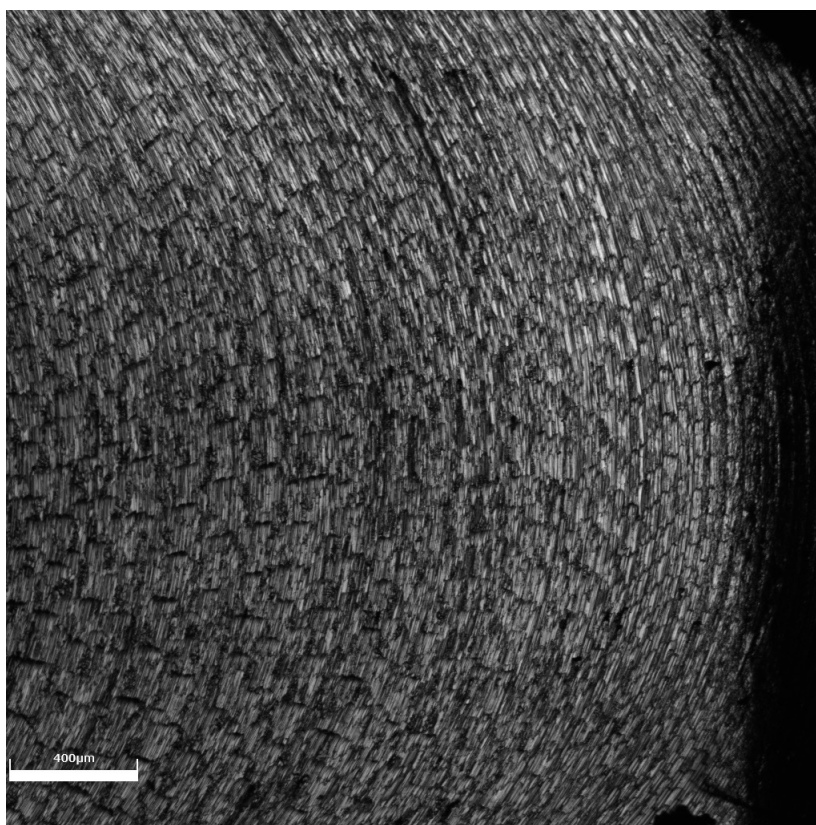


Figura 44: Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 3 com aumento de 5000 vezes.

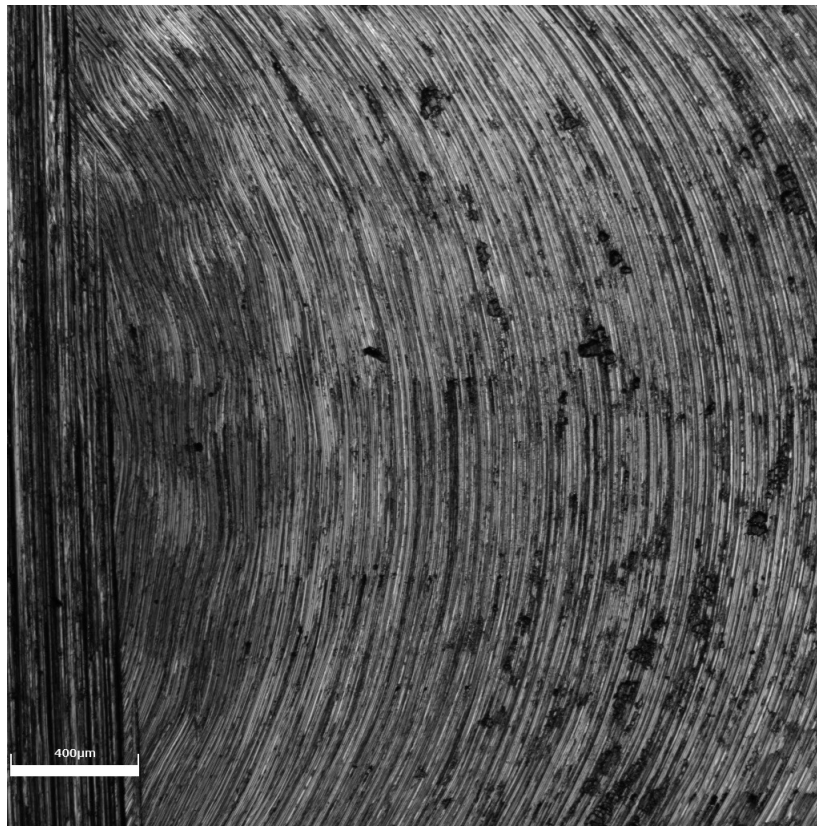


Figura 45: Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 4 com aumento de 5000 vezes.

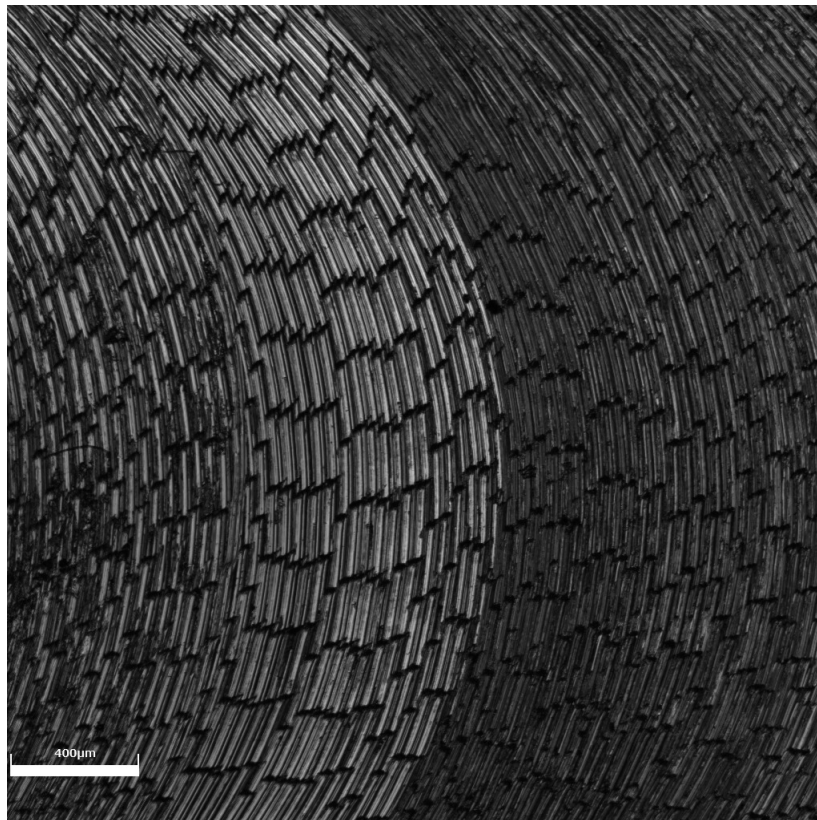


Figura 46: Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 4 com aumento de 5000 vezes.

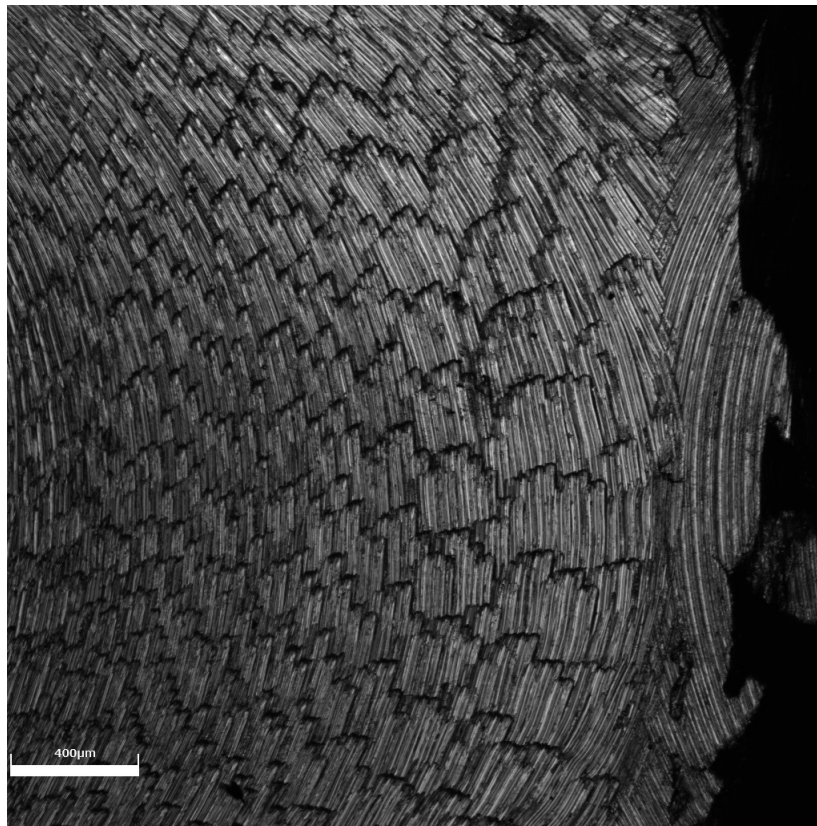


Figura 47: Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 4 com aumento de 5000 vezes.

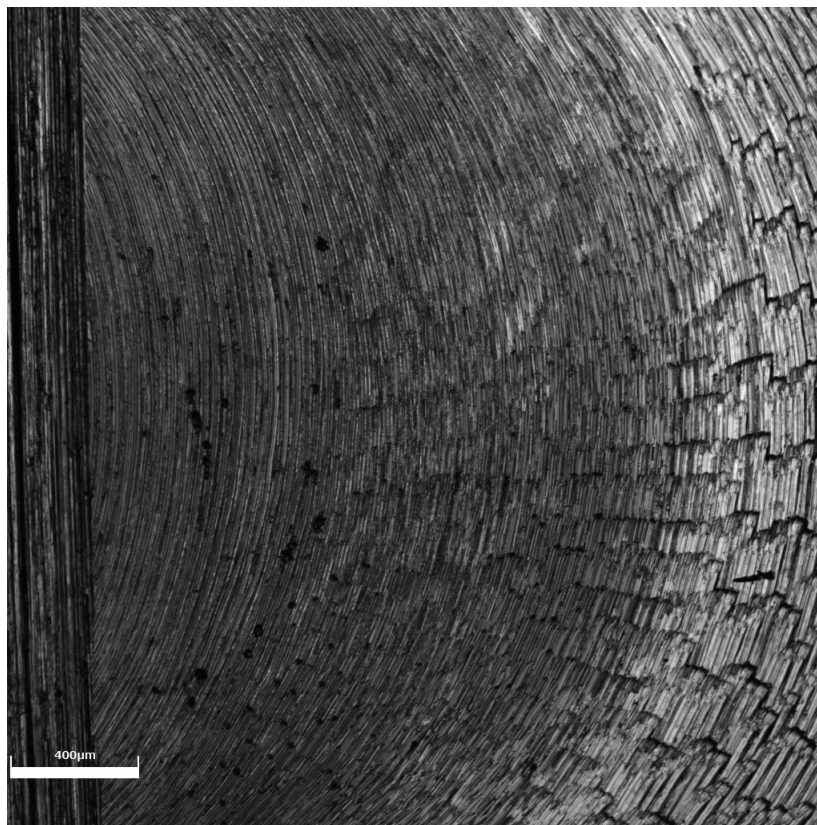


Figura 48: Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 5 com aumento de 5000 vezes.

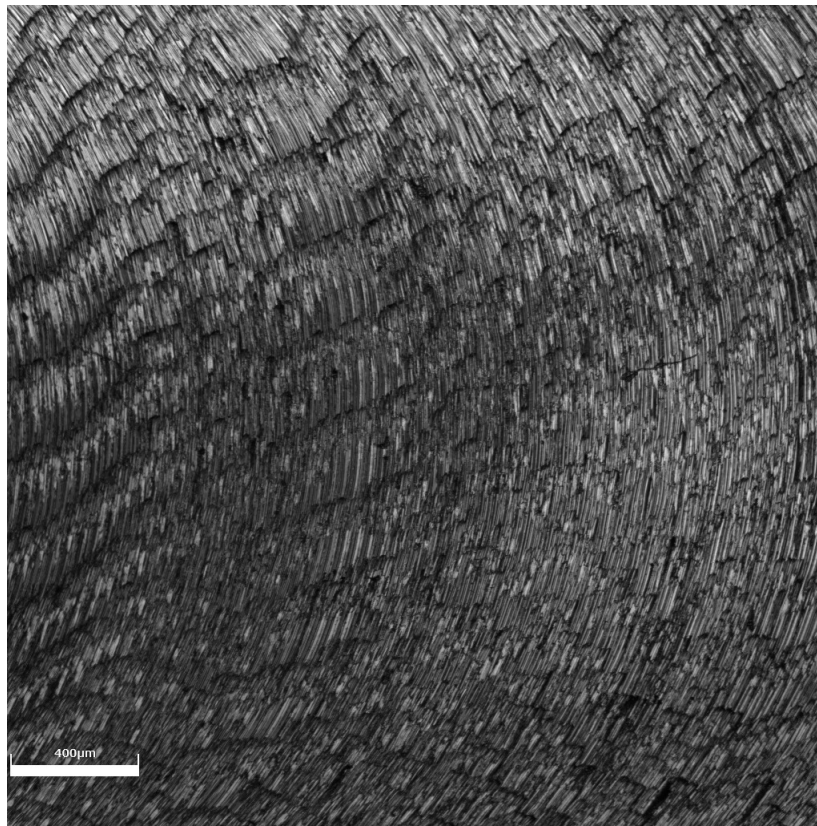


Figura 49: Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 5 com aumento de 5000 vezes.

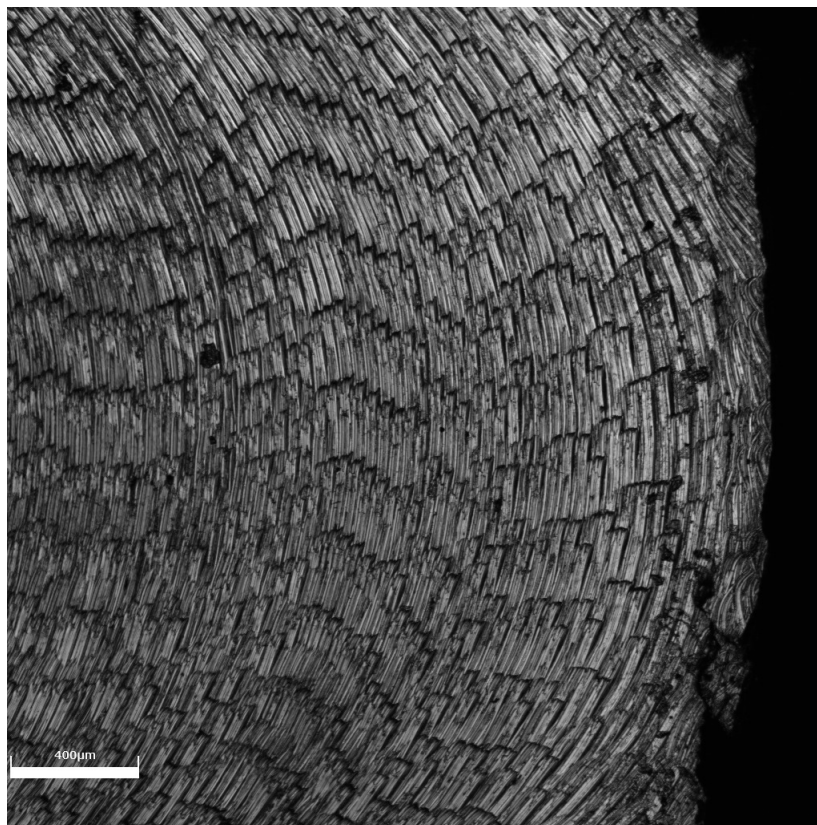


Figura 50: Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 5 com aumento de 5000 vezes.

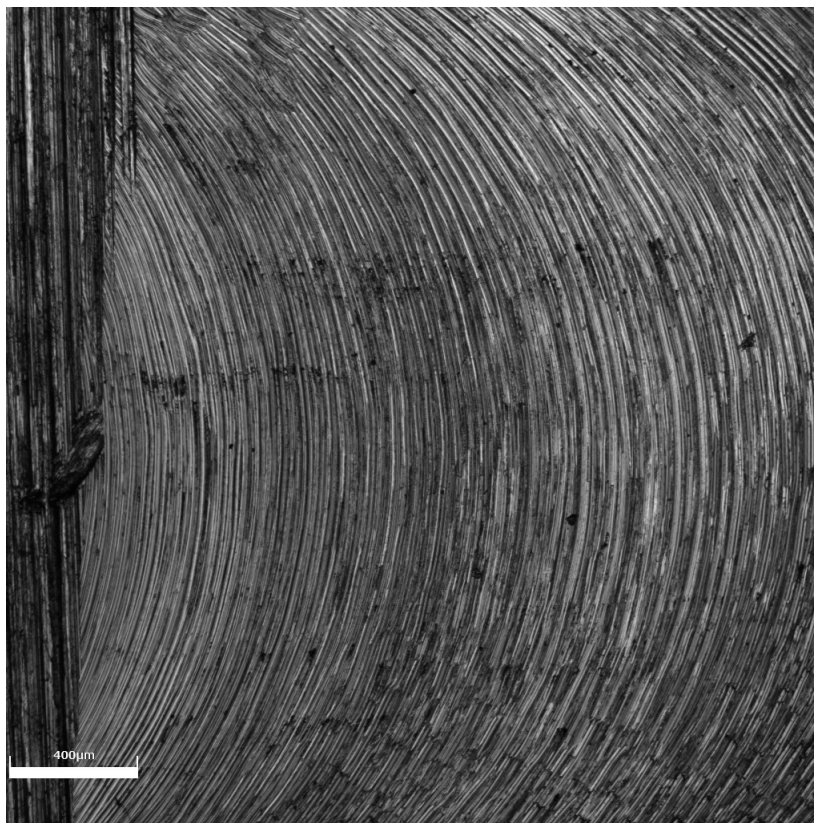


Figura 51: Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 6 com aumento de 5000 vezes.

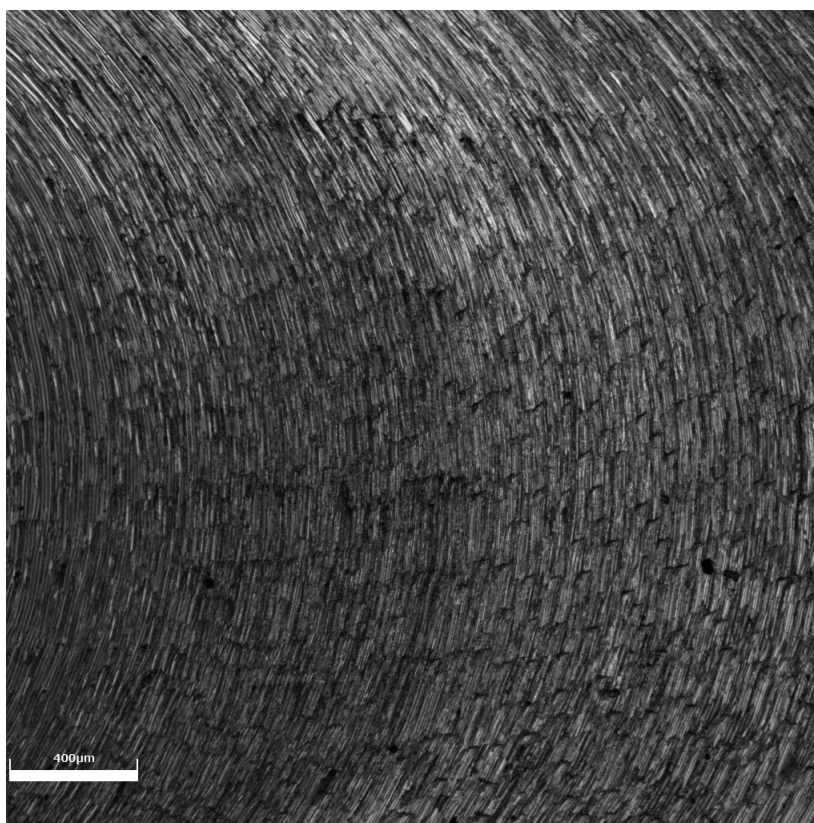


Figura 52: Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 6 com aumento de 5000 vezes.

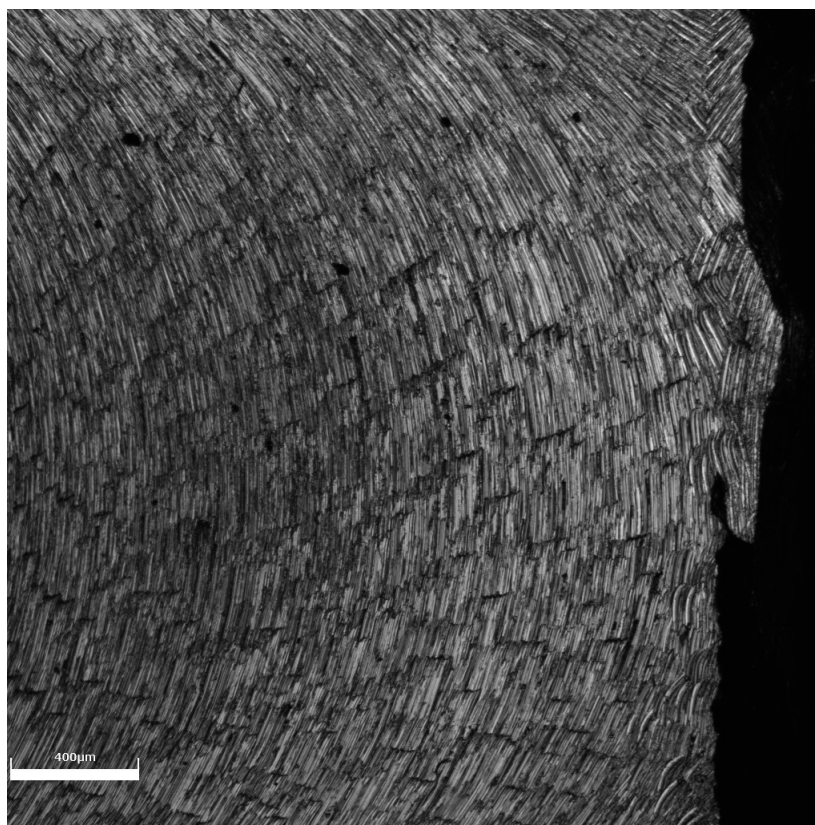


Figura 53: Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 6 com aumento de 5000 vezes.

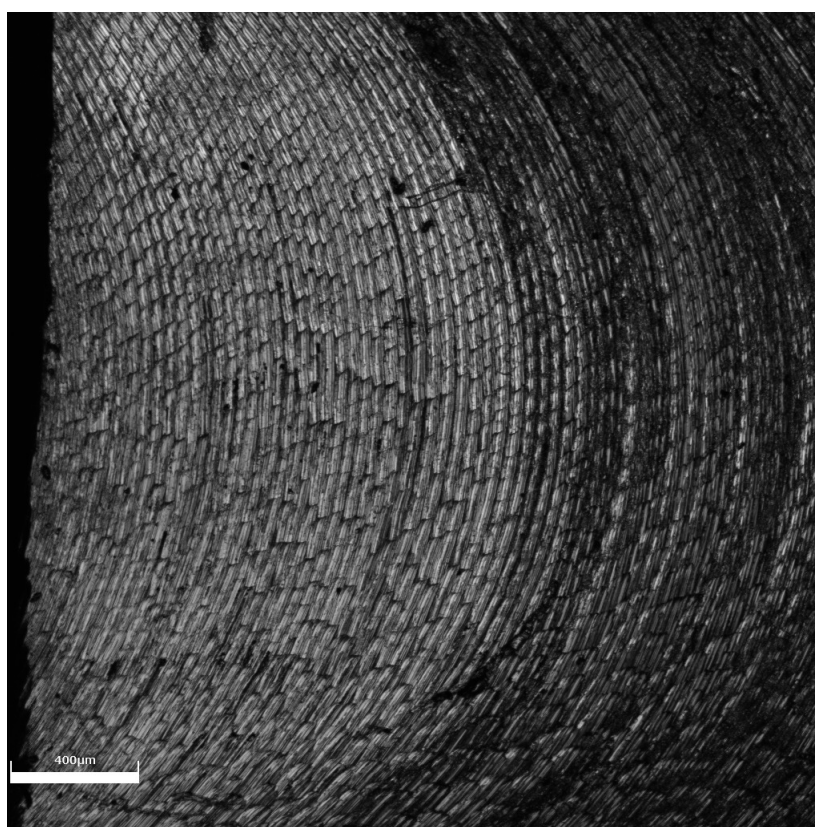


Figura 54: Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 7 com aumento de 5000 vezes.

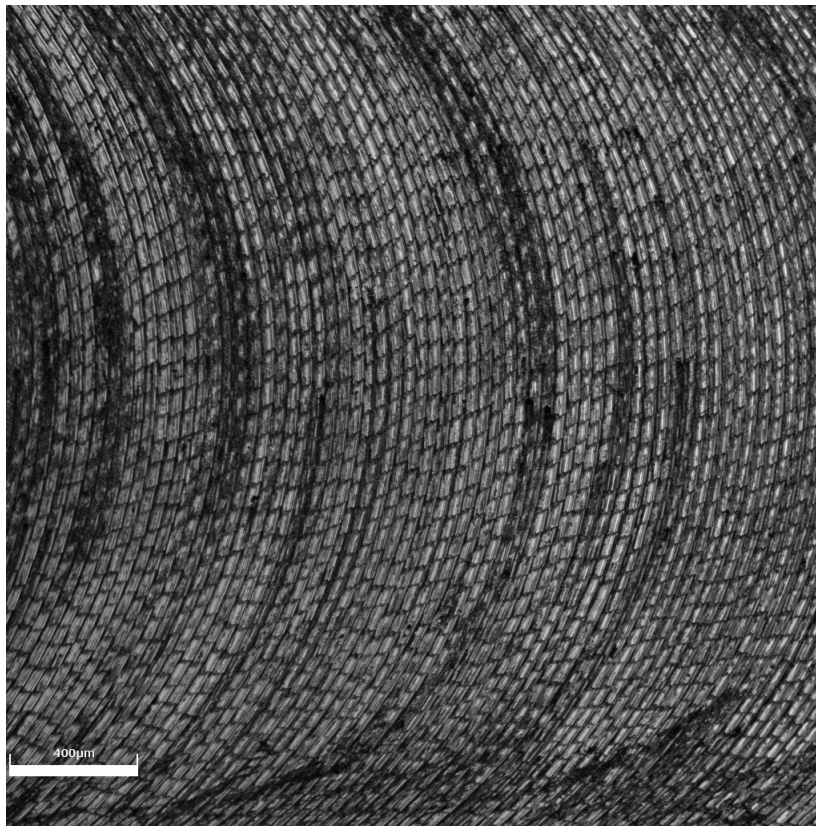


Figura 55: Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 7 com aumento de 5000 vezes.

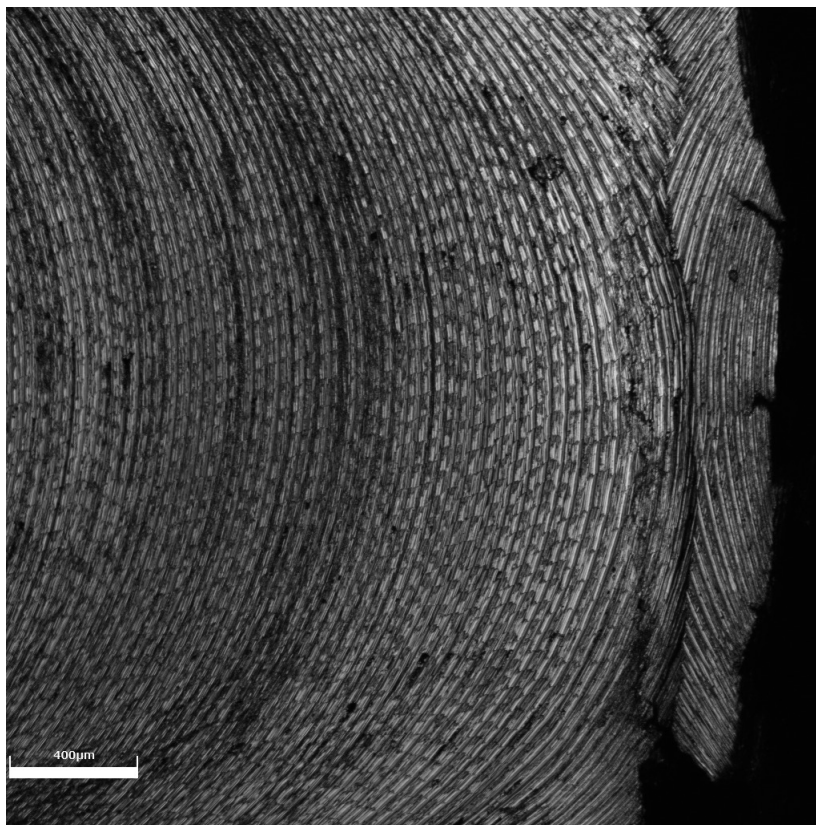


Figura 56: Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 7 com aumento de 5000 vezes.

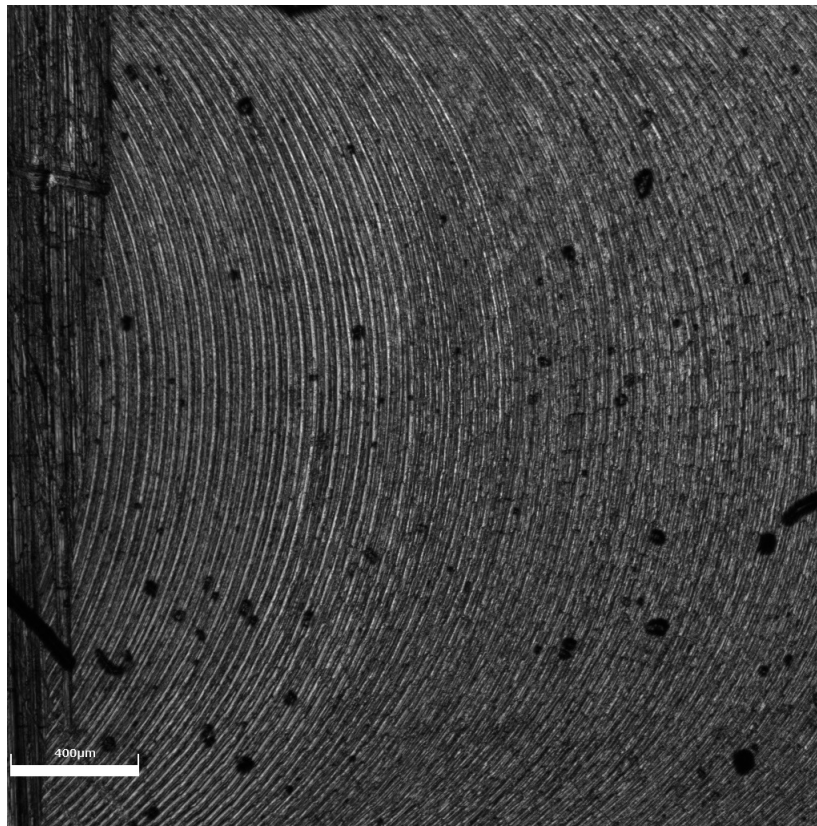


Figura 57: Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 8 com aumento de 5000 vezes.

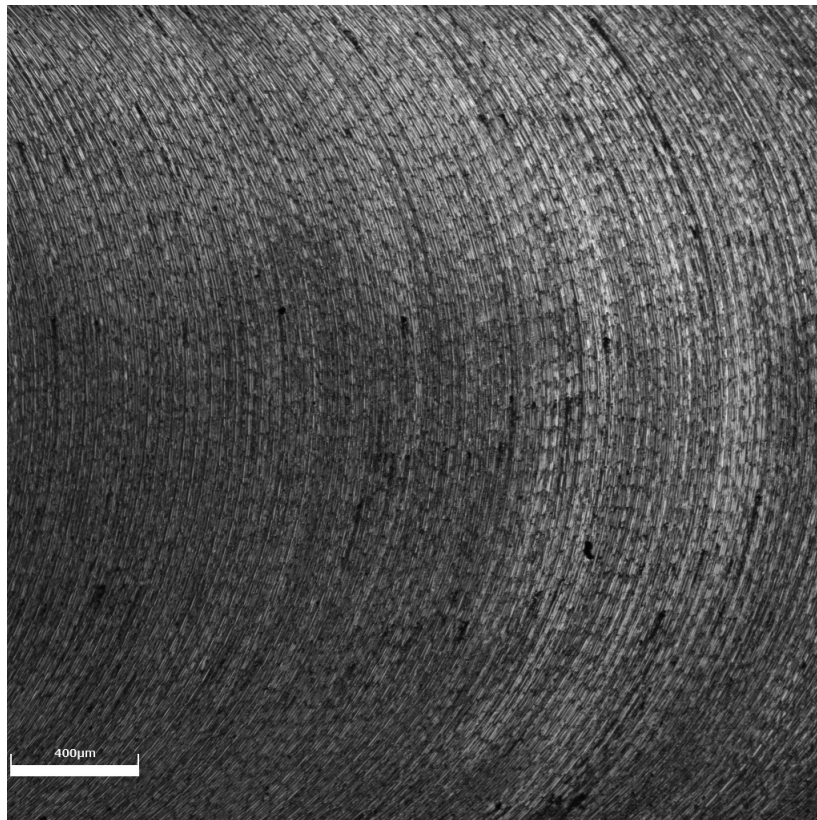


Figura 58: Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 8 com aumento de 5000 vezes.

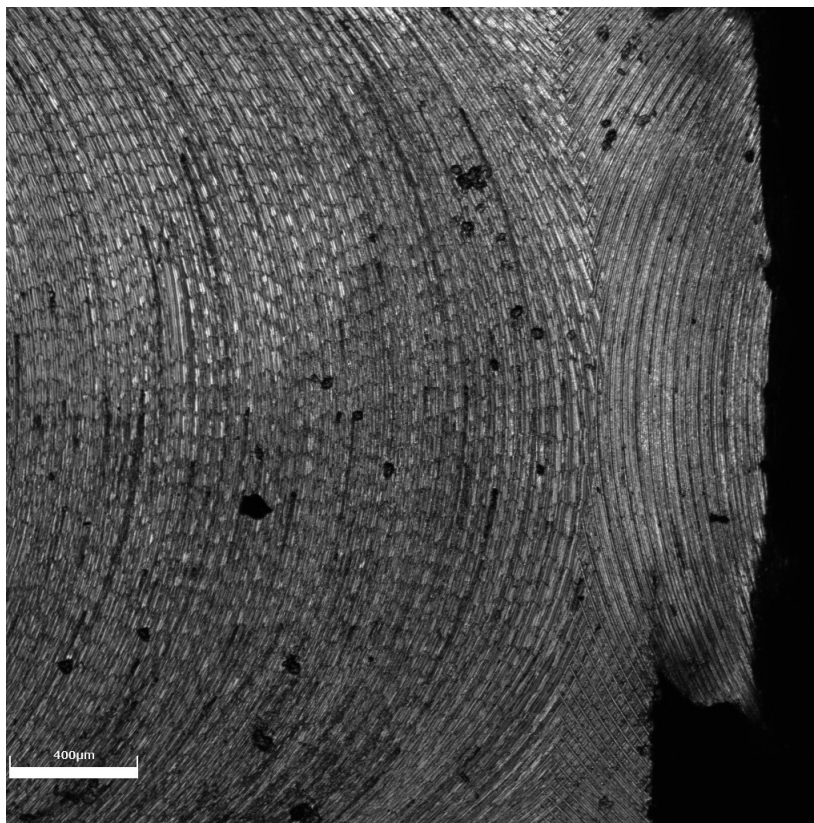


Figura 59: Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 8 com aumento de 5000 vezes.

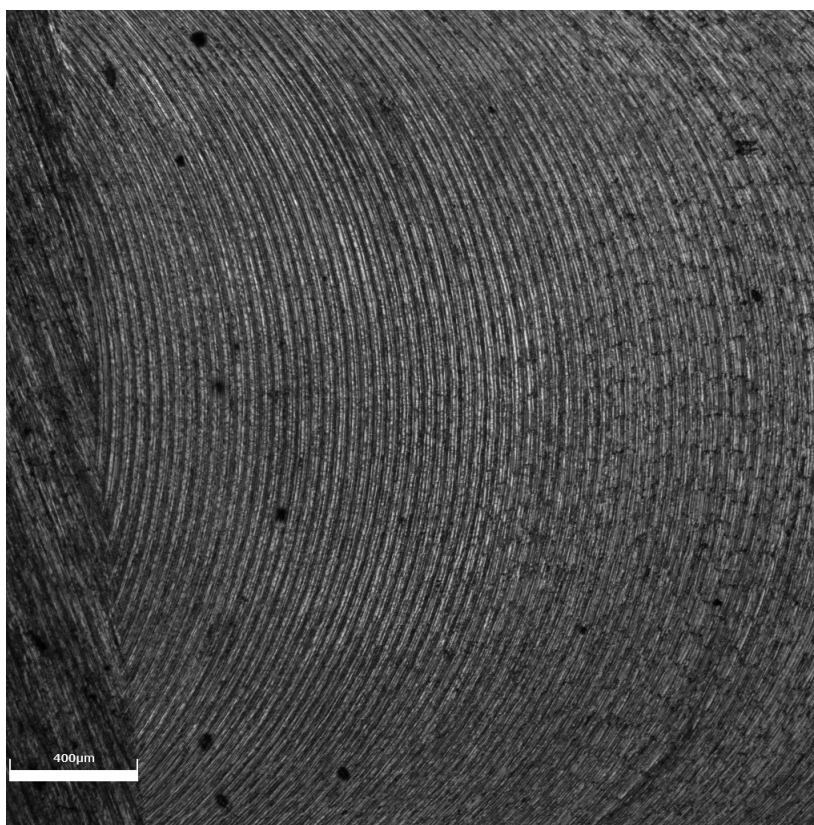


Figura 60: Imagem da superfície de Inconel 718 na entrada do canal 9 com aumento de 5000 vezes.

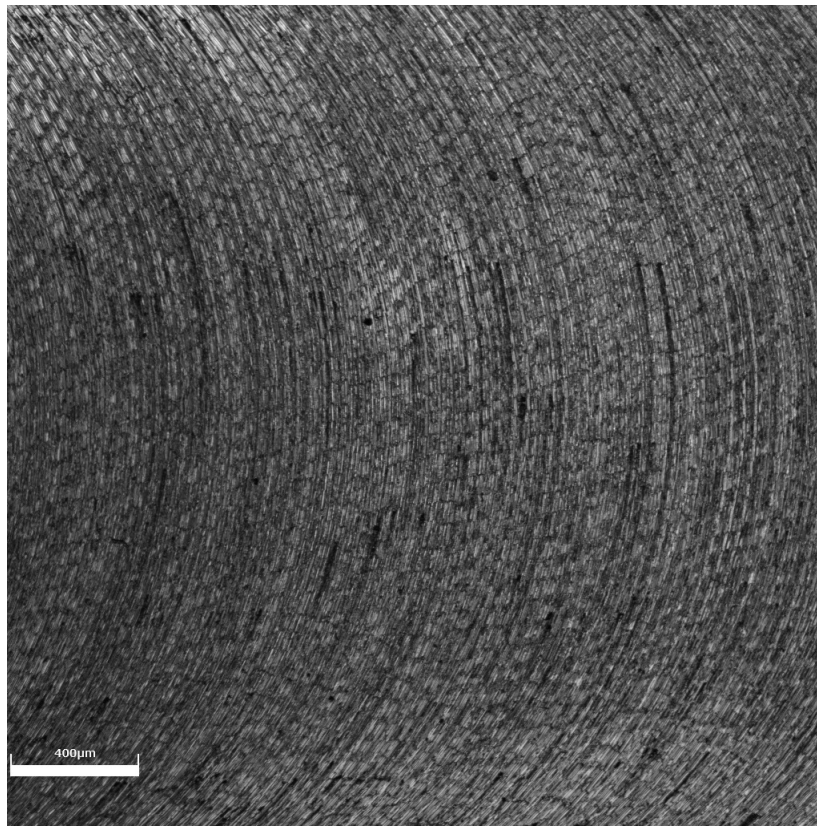


Figura 61: Imagem da superfície de Inconel 718 no meio do canal 9 com aumento de 5000 vezes.

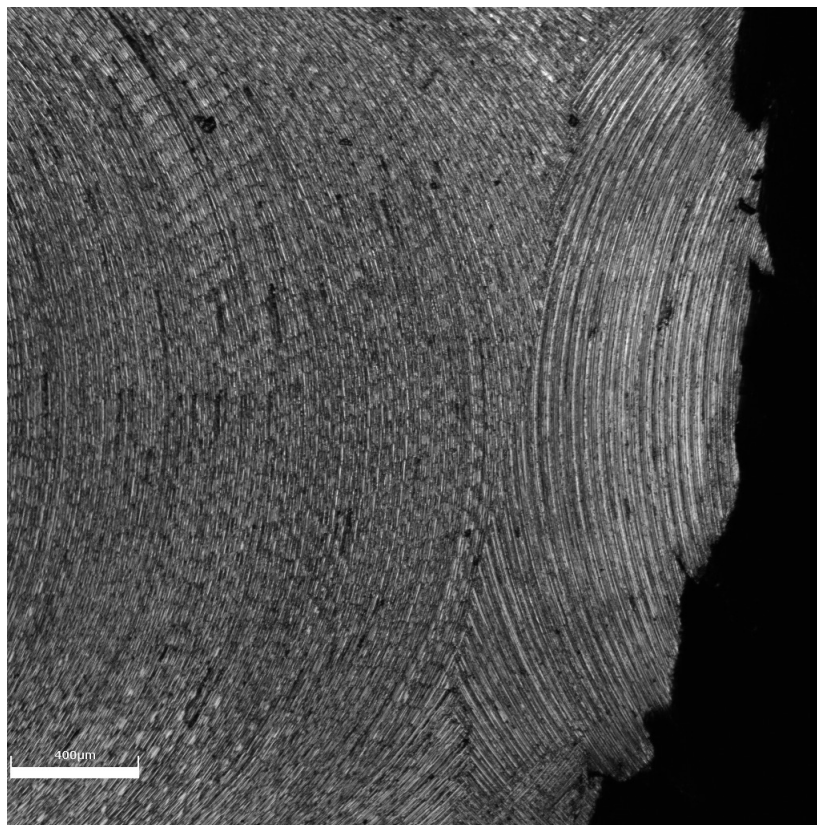


Figura 62: Imagem da superfície de Inconel 718 na saída do canal 9 com aumento de 5000 vezes.