

# **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**Influência das rebarbas e métodos de  
rebarbação na medição de desgaste em  
microcanais de Inconel 718**

Por

**Gabriel de Paiva Silva**

**Brasília, 02 de novembro de 2021**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# **Influência das rebarbas e métodos de rebarbação na medição de desgaste em microcanais de Inconel 718**

Por

**Gabriel de Paiva Silva**

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

### **Banca Examinadora**

Profa. Dra. Déborah de Oliveira  
UnB/ENM (orientadora)

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva  
UFU/FEMEC (coorientador)

Prof. Dr. Cosme Roberto Moreira da Silva  
UnB/ENM

Prof. Dr. Maksym Ziberov  
UnB/ENM

Brasília, 02 de novembro de 2021

# Agradecimentos

Sou grato

A Deus, pelo dom da vida e por ser fonte inesgotável de amor e justiça.

A toda minha família, em especial à minha mãe Roseli, por sua bondade incondicional e seu sacrifício para garantir uma educação de qualidade aos dois filhos que criou sozinha. À minha irmã Laríssa, por acreditar na minha capacidade e torcer pelo meu sucesso.

À Universidade de Brasília, instituição que eu tanto respeito e que me ofereceu incontáveis oportunidades de aprendizado ao longo desses anos de graduação, não apenas no âmbito acadêmico.

À TECMEC, empresa júnior do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB, onde vivi experiências inesquecíveis e superei desafios que eu nunca havia imaginado.

À minha orientadora, professora Déborah de Oliveira, por todo seu apoio e confiança depositados em mim. Ao meu coorientador, professor Márcio Bacci da Silva, da Universidade Federal de Uberlândia, que gentilmente aceitou me coorientar no projeto de graduação e no artigo que desejo publicar.

Por fim, sou muito grato a todos os amigos que fiz na UnB, os quais têm compartilhado comigo momentos bons e ruins e que são essenciais para tornar minha jornada acadêmica muito menos difícil e desgastante, especialmente nestes tempos adversos de pandemia.

# Resumo

Em virtude das crescentes tendências de miniaturização de componentes mecânicos, processos tradicionais de usinagem têm tentado alcançar níveis cada vez mais altos de qualidade superficial e geométrica. O microfresamento não pode ser analisado com as mesmas teorias aplicadas no processo em macroescala, devido aos tamanhos comparáveis da microestrutura do material, da espessura mínima de cavaco e do raio da aresta da ferramenta de corte. O desgaste da ferramenta em microfresamento pode ser medido indiretamente através das dimensões do canal, entretanto, a presença de rebarbas pode levar a imprecisões nessa medição. Diversos autores têm observado a presença de rebarbas ao microfresar o Inconel 718, que é uma superliga de níquel conhecida por sua baixa usinabilidade. Técnicas de rebarbação frequentemente usadas em macrousinagem podem não fornecer a precisão desejada em microescala. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência de métodos de rebarbação em microcanais de Inconel 718. O método de rebarbação abrasiva é simples, versátil e possui baixo custo, sendo amplamente usado industrialmente ao redor do mundo, e por isso foi escolhido neste trabalho. Quatro amostras de Inconel 718, cada uma com 12 microcanais de  $400\ \mu\text{m}$  de largura e  $40\ \mu\text{m}$  de profundidade, foram rebarbadas com lixas de carbetto de silício com granulometrias 800, 1200, 2000 e 3000, durante um intervalo de tempo fixo de 30 s e rotação constante de 120 rpm. O processo de rebarbação promoveu uma diminuição de 98% na altura das rebarbas. O fato das rebarbas terem sido removidas levou a medições mais precisas de largura e profundidade dos microcanais. Dessa forma, o método de rebarbação escolhido se mostrou eficiente em remover rebarbas em superfícies microfresadas de Inconel 718, sem nenhuma deterioração significativa da qualidade superficial das peças.

**Palavras-chave:** Microfresamento, métodos de rebarbação, Inconel 718, qualidade superficial.

# Abstract

Owing to the increasing trends towards miniaturization of mechanical components, traditional machining processes have been trying to attain higher and higher levels of dimensional and geometric quality. Micro-milling cannot be analyzed with the same theories applied in the macro-scale process, due to the comparable sizes of the material microstructure, the minimum chip thickness and the edge radius of the cutting tool. Tool wear in micro-milling can be measured indirectly through the dimensions of the slot, however the presence of burrs may lead to imprecision in this measurement. Several authors have reported the presence of burrs when micro-milling Inconel 718, which is a nickel super-alloy known for its low machinability. Deburring techniques often used in macro-machining may not provide the precision required in micro-scale. Thus, the objective of this work is to evaluate the effectiveness of deburring methods in micro-slots of Inconel 718. The abrasive deburring method is simple, versatile and has a low cost, being widely used industrially throughout the world, and because of that it was chosen in this work. Four samples of Inconel 718, each one with 12 microslots 400  $\mu\text{m}$  wide and 40  $\mu\text{m}$  deep, were deburred with silicon carbide sandpaper sheets with mesh sizes 800, 1200, 2000 and 3000 during a fixed time interval of 30 s and a constant rotation of 120 rpm. The deburring process promoted a reduction of 98% in the burr heights. The fact that the burrs were removed led to more precise measurements of the width and depth of the microslots. Therefore, the chosen deburring method proved to be efficient in removing burrs in micromilled surfaces of Inconel 718, without any significant damage in the surface quality of the workpieces.

**Key-words:** Micro-milling, deburring methods, Inconel 718, surface quality.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Miniaturização aplicada às artes plásticas. Adaptado de Ziberov (2017).	1
Figura 2 – Precisão do processo de microusinagem. Adaptado de Chae, Park e Freiheit (2006).	2
Figura 3 – Exemplo de molde fabricado por microfresamento. Fonte: TAKÁCS, VERÖ e MÉSZÁROS (2003).	3
Figura 4 – <i>Organ on chip</i> . Adaptado de Sun et al. (2016).	3
Figura 5 – Distribuição de temperatura de uma amostra de Inconel 718 em torno da cunha da ferramenta sem desgaste de flanco (esquerda) e com desgaste de flanco de 200 $\mu\text{m}$ (direita). Adaptado de Liu et al. (2021).	6
Figura 6 – Aderência de cavaco nas laterais de um canal obtido por fresamento de topo, com $V_c = 124,4$ m/min e $f_z = 0,05$ mm/dente. Fonte: Liao, Lin e Wang (2008).	8
Figura 7 – Microfresa de metal duro com diâmetro de 100 $\mu\text{m}$ . Fonte: Chae, Park e Freiheit (2006).	10
Figura 8 – Efeito do tamanho do raio da aresta de corte em (a) macrousinagem e (b) microusinagem. Fonte: Aramcharoen e Mativenga (2009).	11
Figura 9 – Efeito da mínima espessura de corte. Adaptado de Chae, Park e Freiheit (2006).	11
Figura 10 – Formação de rebarbas de Poisson. Adaptado de Wu, Li e He (2017).	13
Figura 11 – Tipos de rebarbas encontradas em microfresamento. Adaptado de Wan, Cheng e Sun (2013).	14
Figura 12 – Rebarbas, adesão de cavaco e quebra da ferramenta em um microcanal de liga de titânio. Fonte: Schueler et al. (2010).	15
Figura 13 – Variação da rugosidade superficial do Inconel 718 para <i>TMM</i> e <i>UVAMM</i> . Adaptado de FANG et al. (2020).	17
Figura 14 – Variação no tamanho das rebarbas com diferentes condições de lubrificação. Adaptado de Aslantas e ÇIÇEK (2018).	18
Figura 15 – Rebarbas de grandes dimensões em um microcanal de Inconel 718. Fonte: Oliveira (2019).	19
Figura 16 – Exemplo de rebarbador manual. Adaptado de Gillespie (2003).	22

Figura 17 – Acabamento superficial por tamboreamento vibratório. Adaptado de BOUZID (2017). . . . .	23
Figura 18 – Discos abrasivos utilizados para retificação. Adaptado de Gillespie (1999). . . . .	24
Figura 19 – Medição do tamanho de rebarba antes e depois da rebarbação por <i>micro peening</i> . Adaptado de Kienzler, Deuchert e Schulze (2010). . . . .	26
Figura 20 – Detalhe de um microcanal antes (a) e depois (b) de passar por <i>ultrasonic wet peening</i> . Fonte: Kienzler, Deuchert e Schulze (2010). . . . .	26
Figura 21 – Representação esquemática da rebarbação por escovação assistida por pasta abrasiva. Adaptado de Mathai e Melkote (2012). . . . .	28
Figura 22 – Microcanal de aço ferramenta A2 antes e depois da rebarbação com abrasivo de <i>SiC</i> , de 3 $\mu\text{m}$ , a 15000 rpm. Adaptado de Mathai e Melkote (2012). . . . .	28
Figura 23 – Dimensões em milímetros da microfresa usada na usinagem das amostras, do fabricante Mitsubishi. . . . .	31
Figura 24 – Esquema da geometria e dimensões dos canais nas amostras de Inconel 718. Dimensões em milímetros. Fonte: Oliveira (2019). . . . .	32
Figura 25 – Lixadeira utilizada no ensaio de rebarbação. . . . .	33
Figura 26 – Rebarbas em microcanal de Inconel 718 comprometendo a medição precisa da largura. . . . .	34
Figura 27 – Amostra posicionada no microscópio utilizado no experimento. . . . .	35
Figura 28 – Medição da rugosidade ao longo dos microcanais. . . . .	36
Figura 29 – Medição da altura de rebarbas e profundidade dos microcanais. . . . .	37
Figura 30 – Exemplificação das pequenas imprecisões na medição de largura devido às rebarbas nas paredes do microcanal. . . . .	38
Figura 31 – Valores de rugosidade para o ensaio com $n = 11000$ rpm. . . . .	39
Figura 32 – Valores de rugosidade para a réplica com $n = 11000$ rpm. . . . .	40
Figura 33 – Valores de rugosidade para o ensaio com $n = 20000$ rpm. . . . .	40
Figura 34 – Valores de rugosidade para a réplica com $n = 20000$ rpm. . . . .	40
Figura 35 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio com $n = 11000$ rpm. . . . .	42
Figura 36 – Valores de altura de rebarbas para a réplica com $n = 11000$ rpm. . . . .	42
Figura 37 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio com $n = 20000$ rpm. . . . .	43
Figura 38 – Valores de altura de rebarbas para a réplica com $n = 20000$ rpm. . . . .	43
Figura 39 – Contraste da presença de rebarbas em um microcanal representativo. . . . .	45
Figura 40 – Valores de largura dos canais para o ensaio com $n = 11000$ rpm. . . . .	46
Figura 41 – Valores de largura dos canais para a réplica com $n = 11000$ rpm. . . . .	46
Figura 42 – Valores de largura dos canais para o ensaio com $n = 20000$ rpm. . . . .	46
Figura 43 – Valores de largura dos canais para a réplica com $n = 20000$ rpm. . . . .	47
Figura 44 – Valores de profundidade dos canais para o ensaio com $n = 11000$ rpm. . . . .	48
Figura 45 – Valores de profundidade dos canais para a réplica com $n = 11000$ rpm. . . . .	48
Figura 46 – Valores de profundidade dos canais para o ensaio com $n = 20000$ rpm. . . . .	48
Figura 47 – Valores de profundidade dos canais para a réplica com $n = 20000$ rpm. . . . .	49

Figura 48 – Canal 12 do ensaio com $n = 11000$ rpm. . . . .	51
Figura 49 – Canal 12 da réplica com $n = 20000$ rpm. . . . .	52

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades físicas do Inconel 718. Adaptado de Jeyapandiarajan e Anthony (2019). . . . .	6
Tabela 2 – Processos de rebarbação mais utilizados no mundo. Adaptado de Gillespie (1999). . . . .	20
Tabela 3 – Perfis de corte obtidos por rebarbação mecânica e a laser. Adaptado de Lee e Dornfeld (2001). . . . .	27
Tabela 4 – Composição química do Inconel 718. Adaptado de Oliveira (2019). . . . .	30
Tabela 5 – Parâmetros de corte usados por Oliveira (2019) no microfresamento das amostras. . . . .	32
Tabela 6 – Parâmetros de rebarbação. . . . .	34

# Lista de abreviaturas e siglas

<i>CFC</i>	Cúbica de Face Centrada
<i>DLC</i>	<i>Diamond-Like Carbon</i> (Carbono Tipo Diamante)
<i>EDS</i>	<i>Energy-Dispersive Spectroscopy</i> (Espectroscopia de Energia Dispersiva)
<i>MQL</i>	Mínima Quantidade de Lubrificação
<i>TMM</i>	<i>Traditional Micromilling</i> (Microfresamento Tradicional)
<i>UVAMM</i>	<i>Ultrasonic Vibration Assisted Micromilling</i> (Microfresamento Assis- tido por Vibrações Ultrassônicas)

# Lista de símbolos

$\varnothing$	Diâmetro
$\alpha$	Ângulo de saída
$\gamma, \gamma', \gamma''$	Fases microestruturais de uma superliga de níquel
$a_e$	Penetração de trabalho
$a_p$	Profundidade de corte
$f$	Avanço
$f_z$	Avanço por dente
$h$	Espessura de corte
$h_m$	Espessura mínima de corte
$n$	Rotação
$r_e$	Raio da aresta de corte
$VB_s$	Desgaste de flanco
$v_c$	Velocidade de corte

# Sumário

	<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização geral	1
1.2	Objetivos	4
	<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	Inconel 718	5
2.1.1	Usinabilidade	6
2.2	Microfresamento	9
2.2.1	Efeito escala	10
2.2.2	Rebarbas em microfresamento	12
2.3	Microfresamento em Inconel 718	16
2.4	Métodos de rebarbação	19
2.5	Rebarbação em microusinagem	25
	<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>30</b>
3.1	Caracterização do material	30
3.2	Microfresamento das amostras	30
3.3	Rebarbação das amostras	32
3.4	Variáveis de saída	34
3.4.1	Rugosidade dos microcanais	36
3.4.2	Topografia das amostras	36
	<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>39</b>
4.1	Rugosidade	39
4.2	Altura das rebarbas	42
4.3	Largura dos microcanais	45
4.4	Profundidade dos microcanais	47
4.5	Qualidade superficial dos microcanais	50
	<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>53</b>
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	54

<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>55</b>
<b>APÊNDICES</b>	<b>60</b>
<b>APÊNDICE A – COBEM-2021-0129</b> . . . . .	<b>61</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO A – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE</b> . . .	<b>71</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização geral

Nas últimas décadas, as tecnologias de microfabricação têm ganhado destaque. Pesquisas têm sido impulsionadas pela necessidade de criação de produtos e componentes cada vez mais compactos e com elevadas precisões dimensionais e geométricas, especialmente nas indústrias bioquímica, biotecnológica, aeroespacial e eletrônica. São grandes as demandas de mercado não apenas para a fabricação de peças pequenas, mas também para adição de características estruturais complexas e de pequena dimensão em peças grandes, para aprimorar suas funcionalidades (CÂMARA, 2014).

Há aplicações de miniaturização não apenas no ramo tecnológico, mas também nas artes plásticas (ZIBEROV, 2017). Na figura 1, do lado esquerdo (a), mostra-se um fio de cabelo perfurado longitudinalmente e polido por dentro e por fora até ficar transparente, dentro do qual foi colocada uma escultura de uma rosa de diâmetro  $50 \mu\text{m}$ . No lado direito (b), mostra-se um conjunto de chaleira e taças miniaturizadas colocadas sobre um grão de açúcar.

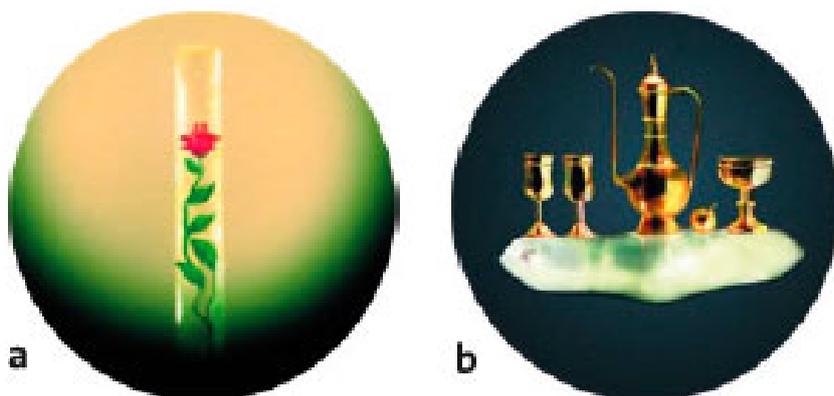


Figura 1 – Miniaturização aplicada às artes plásticas. Adaptado de Ziberov (2017).

O design de ferramentas de corte usadas na usinagem mecânica tradicional tem passado por contínuas melhorias para permitir a criação de peças através da remoção de cavacos cada vez menores. Chae, Park e Freiheit (2006) comentam que as ferramentas na microusinagem não podem ser consideradas perfeitamente afiadas, pois muitas vezes

o raio da ferramenta é maior do que a espessura de corte. Dessa forma, na usinagem em escala micro, não podem ser aplicados os mesmos princípios usados em escala macro.

De acordo com Chae, Park e Freiheit (2006), o microusinagem é um processo usado para fabricar dispositivos e componentes miniaturizados. Uma das formas mais usuais de microusinagem mecânica é o microfresamento, devido à versatilidade na produção de diferentes geometrias. Ainda não existe uma única definição para a microusinagem. Para CÂMARA et al. (2012), esse processo pode ser definido por meio do diâmetro da microferramenta, o qual deve ter entre  $1\ \mu\text{m}$  e  $1000\ \mu\text{m}$ . Já Ng et al. (2006) relacionam esse processo com a espessura de cavaco, que deve estar em torno de alguns nanômetros a poucos micrometros, conforme observado na figura 2.



Figura 2 – Precisão do processo de microusinagem. Adaptado de Chae, Park e Freiheit (2006).

O microfresamento é geralmente usado para a confecção de canais, cavidades e formatos tridimensionais côncavos ou convexos. Para o desenvolvimento da tecnologia de microfresamento, é fundamental o entendimento do mecanismo de geração de cavaco nessa escala de dimensões, bem como a influência de cada parâmetro inerente ao processo (JAIN, 2013).

O microfresamento é usado nas mais diversas áreas. Alguns exemplos de sua aplicação que podem ser citados são a fabricação de componentes microeletromecânicos, peças de relógios de pulso, microfuros para arrefecimento em paletas de turbinas, bicos de injeção de combustível, microsensores, microatuadores, dispositivos cirúrgicos, entre outros (VENKATESH et al., 2017). Uma outra aplicação comum é a fabricação de moldes de microinjeção, como o mostrado na figura 3.

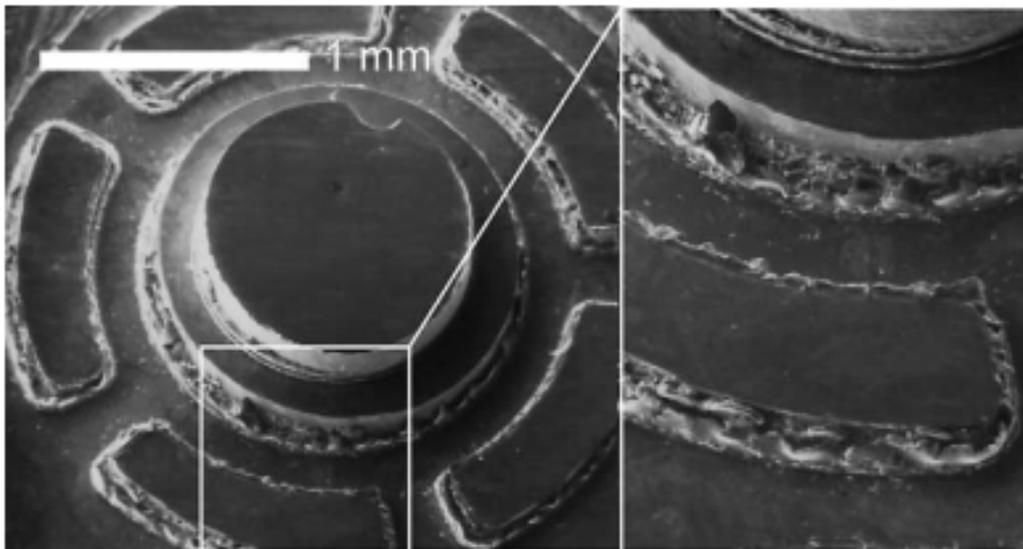


Figura 3 – Exemplo de molde fabricado por microfresamento. Fonte: TAKÁCS, VERÖ e MÉSZÁROS (2003).

Uma outra aplicação recente da microusinagem é a fabricação de *organs on chips* (figura 4). Esses componentes são sistemas biomiméticos baseados em chips tridimensionais multi-canaís de cultura de células microfluídicas, que simulam as atividades e a resposta fisiológica de órgãos humanos, funcionando como órgãos artificiais. Segundo Sun et al. (2016), a tecnologia dos *organs on chips* tem o potencial de superar os modelos tradicionais de cultura de células em 2D e os testes em animais, podendo revolucionar a indústria farmacêutica.

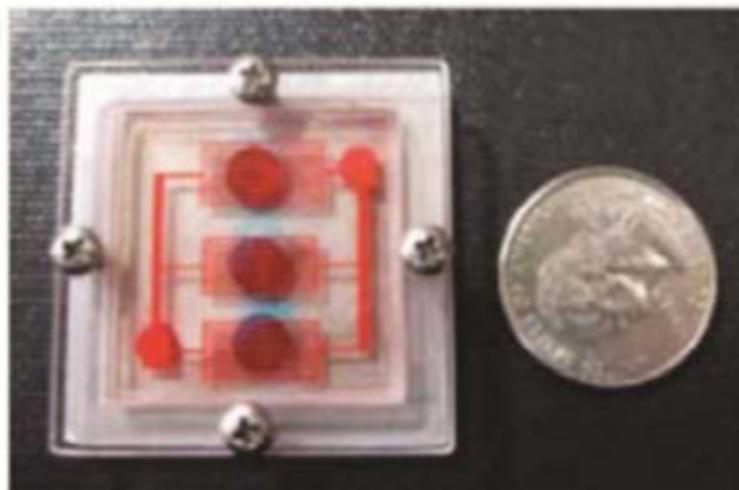


Figura 4 – *Organ on chip*. Adaptado de Sun et al. (2016).

Um problema recorrente nos processos de microfresamento é a formação de rebarbas, que são indesejáveis pois afetam aspectos como desempenho, custo e aparência do produto usinado. Por isso, os processos de acabamento superficial e de rebarbação são de grande interesse econômico. As rebarbas podem ser removidas através das mais diversas técnicas, desde os métodos tradicionais de usinagem mecânica até avançadas tecnologias

de rebarbação térmica ou eletroquímica. No entanto, segundo Gillespie (2003), os custos associados ao uso de tecnologias menos convencionais de rebarbação torna esses métodos menos vantajosos economicamente, já que não agregam valor ao produto final. Além disso, os métodos de rebarbação usados em escala macro nem sempre conseguem atingir o grau de precisão desejado para microcomponentes, o que dificulta ainda mais a remoção de rebarbas nessa escala de tamanho.

O Inconel 718 é uma superliga de níquel que possui propriedades muito desejáveis, como alta resistência mecânica, resistência à fadiga e à corrosão e capacidade de operar continuamente em temperaturas elevadas. Entretanto, ele é conhecido por ser um material de baixa usinabilidade. Além disso, a presença de rebarbas de grandes dimensões é frequente ao microfresar o Inconel 718, como pode ser observado nos trabalhos de Uzun, Aslantas e Bedir (2015), Oliveira (2019) e FANG et al. (2020).

O microfresamento é um campo de pesquisa relativamente recente, por isso os trabalhos publicados nessa área ainda são escassos em comparação com os trabalhos sobre fresamento em macroescala. Além disso, poucos trabalhos são publicados na área de remoção de rebarbas em microcomponentes. Dessa forma, percebe-se a necessidade do desenvolvimento de mais pesquisas sobre a rebarbação de peças miniaturizadas, especialmente em materiais de baixa usinabilidade como o Inconel 718, a fim de contribuir para a maior compreensão dessa tecnologia.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de realizar a rebarbação de microcanais obtidos por microfresamento em amostras de Inconel 718. Para a compreensão das influências do método de rebarbação escolhido na qualidade final das peças e na medição de desgaste da microfresa, este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a rugosidade dos microcanais antes e depois da rebarbação;
- Analisar a altura das rebarbas antes e depois da rebarbação;
- Analisar a profundidade dos microcanais antes e depois da rebarbação;
- Realizar a medição indireta do desgaste da ferramenta medindo a largura dos canais antes e depois da rebarbação;
- Avaliar qualitativamente a eficácia do método de rebarbação escolhido através de imagens de microscopia.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Inconel 718

As superligas à base de níquel têm sido bastante utilizadas em aplicações que envolvem operações a altas temperaturas, por apresentarem excelente resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão. O níquel apresenta estabilidade em sua estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) da temperatura ambiente até seu ponto de fusão, dessa forma não há transformações de fase que causam expansões e contrações, o que viabiliza seu uso em condições de altas temperaturas. Sua estrutura lhe permite ser ao mesmo tempo resistente e dúctil, devido a uma considerável energia de ligação fornecida pelos elétrons externos da camada "d". Além disso, em comparação com outros metais de transição que apresentam a mesma estrutura cristalina, o níquel é menos denso e mais barato, o que justifica seu uso recorrente como solvente nestas superligas (REED, 2006).

A maioria dos elementos utilizados em superligas de níquel são metais de transição, cujos comportamentos e influências sobre a estabilidade das fases dependem de sua posição na tabela periódica. Conforme Reed (2006), a microestrutura típica de tais superligas consiste em três diferentes fases:

- A fase  $\gamma$ , que exhibe estrutura CFC e possibilita a formação de uma matriz contínua na qual outras fases podem permanecer;
- Os precipitados  $\gamma'$  ou  $\gamma''$ , que são fases precipitadas coerentes com a matriz  $\gamma$ , sendo que a fase  $\gamma''$  é formada preferencialmente à  $\gamma'$  em superligas níquel-ferro e nas ligas ricas em nióbio;
- Carbonetos e boretos, que ocorrem devido a reações do carbono ou boro com outros elementos reativos e ficam situados nas fronteiras de grão da fase  $\gamma$  (REED, 2006).

Segundo Veiga, Faria e Coelho (2012), o Inconel 718 é uma das superligas de níquel mais utilizadas no mundo, sendo frequentemente encontrado em ambientes agressivos, tais como palhetas de turbinas a gás, rotores de turbo-alimentadores, reatores nucleares de água pressurizada, sistemas de exaustão, caldeiras de resíduos incinerados, entre outros. A tabela 1 apresenta as propriedades físicas do Inconel 718.

Tabela 1 – Propriedades físicas do Inconel 718. Adaptado de Jeyapandiarajan e Anthony (2019).

Propriedade	Valor
Massa específica	8,19 g/cm <sup>3</sup>
Ponto de fusão	1336°C
Coefficiente de expansão (20 - 100°C)	13,0 μm/m°C
Módulo de cisalhamento	77,2 GPa
Módulo de elasticidade	204,9 GPa
Dureza Rockwell	38 HRC

### 2.1.1 Usinabilidade

As propriedades desejáveis do Inconel 718, por sua vez, acarretam um grande problema: a baixa usinabilidade. Por ser amplamente conhecido como um material difícil de usinar, esta superliga de níquel tem sido tema de diversas pesquisas recentes que buscam melhorar sua usinabilidade sob diferentes condições de usinagem.

Liu et al. (2021) fizeram uma investigação numérica e experimental do efeito da geometria da ferramenta sobre as tensões residuais na usinagem ortogonal dessa superliga. Os autores observaram uma forte influência do campo de temperatura na formação de tensões residuais compressivas termicamente induzidas, especialmente em condições de ângulo de saída negativo. Isso acontece porque o atrito entre a amostra e a ferramenta gera grande quantidade de calor, que fica limitado em uma pequena espessura próxima à superfície devido à baixa condutividade térmica do Inconel 718. Conforme pode ser observado na figura 5, foi detectada uma notória mudança na distribuição da temperatura da amostra quando a geometria da ferramenta muda do seu estado afiado para desgastado ( $VB_s = 200 \mu\text{m}$ ). Houve um aumento de cerca de 36% da temperatura máxima na superfície usinada quando a ferramenta apresenta desgaste de flanco de  $200 \mu\text{m}$ , o que indica a presença de elevado atrito (LIU et al., 2021).

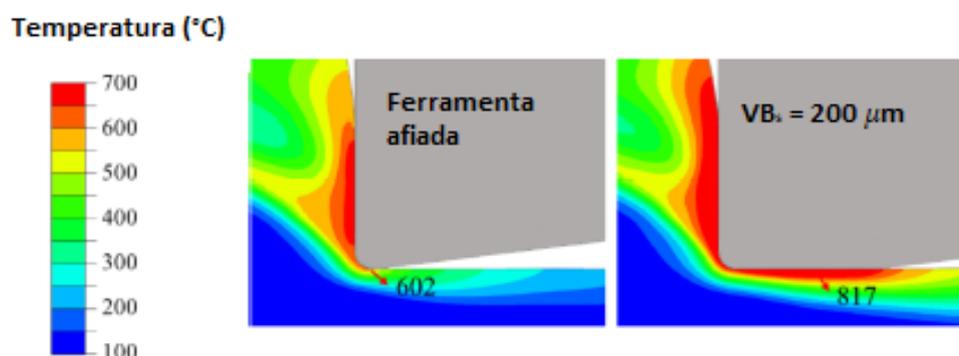


Figura 5 – Distribuição de temperatura de uma amostra de Inconel 718 em torno da cunha da ferramenta sem desgaste de flanco (esquerda) e com desgaste de flanco de  $200 \mu\text{m}$  (direita). Adaptado de Liu et al. (2021).

Essa característica também foi observada por Beer, Özkaya e Biermann (2014), que propuseram adaptações geométricas em brocas helicoidais de metal duro a fim de aumentar a resistência ao desgaste abrasivo e diminuir as tensões térmicas em processos de furação do Inconel 718. Foi observado que mecanismos de abrasão e aderência dominam o desgaste do material devido à grande quantidade de carbonetos em sua matriz metálica. De acordo com esses autores, operações de usinagem do Inconel 718 geralmente envolvem resfriamento por fluidos de corte a fim de reduzir as tensões térmicas e facilitar a saída de cavaco. No entanto, os impactos negativos associados a esses fluidos têm feito com que seu uso seja questionado por diversos autores. Muitos fluidos de corte convencionais não são biodegradáveis, causam contaminação do solo e da água, estão sujeitos a rigorosas leis de proteção ambiental e podem ser nocivos para a saúde do operador (ZHANG; LI; WANG, 2012). Por esse motivo, as demandas do mercado por soluções mais ecologicamente sustentáveis têm feito com que cada vez mais indústrias utilizem métodos de usinagem a seco ou com mínima quantidade de lubrificação (*MQL*), embora o uso de tais técnicas na furação do Inconel 718 provoque grande deterioração da subsuperfície e baixíssima vida da ferramenta (BEER; ÖZKAYA; BIERMANN, 2014).

Bushlya, Zhou e Stahl (2012) fizeram o torneamento do Inconel 718 utilizando ferramentas de nitreto de boro cúbico policristalino sem revestimento e com revestimento de nitreto de titânio (*TiN*), a fim de determinar como a presença de revestimento influencia nas forças de corte, vida da ferramenta, mecanismos de desgaste e integridade superficial. Os autores constataram que a presença do revestimento provocou um aumento de até 20% na vida da ferramenta, embora esse aumento seja limitado a condições de baixa velocidade de corte. Esse parâmetro mostrou ser altamente sensível à velocidade de corte, pois um aumento de 250 m/min para 350 m/min provocou um decréscimo de 250% na vida da ferramenta. Além disso, a presença de revestimento demonstrou uma tendência de transição de tensões superficiais compressivas para trativas (BUSHLYA; ZHOU; STAHL, 2012).

Liao, Lin e Wang (2008) investigaram o comportamento de ferramentas de metal duro em operações de fresagem de topo. Foi observado que surgem grandes quantidades de precipitado  $\gamma'$  e  $\gamma''$  quando o Inconel 718 se deforma, dificultando movimentos de discordância e provocando o endurecimento do material. Abaixo de 650°C, a dureza do material aumenta com a temperatura. Para velocidades de corte muito baixas (menores que 56,6 m/min), a temperatura na região do corte é menor que o ponto de amolecimento da fase  $\gamma'$ . Já para velocidades excessivamente altas (a partir de 124,4 m/min), a saída de cavaco é altamente prejudicada porque boa parte do cavaco se adere às bordas do canal em um processo similar ao de "soldagem" (figura 6). Uma das principais conclusões dos autores, portanto, foi de que as melhores velocidades de fresamento de topo se encontram na faixa de 90 m/min a 110 m/min para que o Inconel 718 se amoleça apenas o suficiente para que a ferramenta de metal duro mantenha sua capacidade de corte (LIAO; LIN; WANG, 2008).

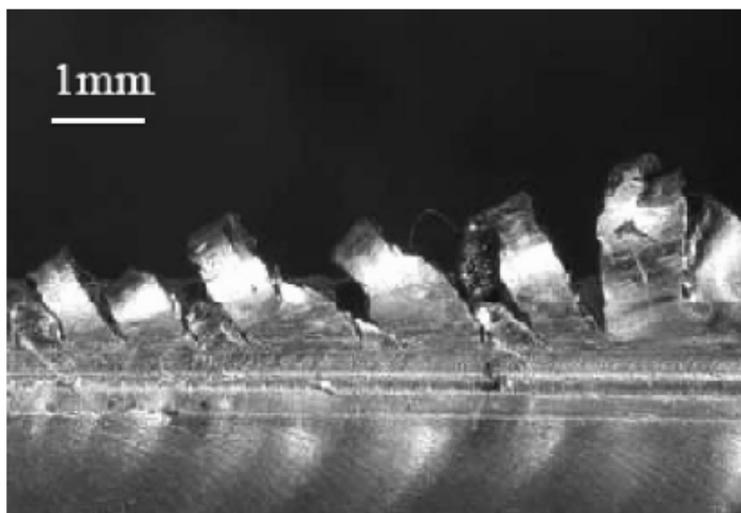


Figura 6 – Aderência de cavaco nas laterais de um canal obtido por fresamento de topo, com  $V_c = 124,4$  m/min e  $f_z = 0,05$  mm/dente. Fonte: Liao, Lin e Wang (2008).

Um método de resfriamento alternativo à lubrificação por fluidos de corte tradicionais é a usinagem criogênica. Nesse processo, gases como nitrogênio e hélio, liquefeitos a baixíssimas temperaturas, são utilizados para resfriar a peça usinada, a ferramenta de corte ou ambos. Uma vantagem significativa dessa técnica é que os gases criogênicos podem ser eliminados de volta para a atmosfera sem efeitos nocivos ao meio ambiente. Além disso, a exposição a temperaturas baixas (próximas a  $-196$  °C) pode causar um impacto positivo nas propriedades da peça e da ferramenta, melhorando a usinabilidade (SHOKRANI; NEWMAN, 2018).

Um estudo realizado por Musfirah, Ghani e Haron (2017) permitiu investigar a efetividade do resfriamento criogênico com gás nitrogênio no fresamento do Inconel 718 em comparação ao processo a seco, considerando a taxa de desgaste da ferramenta, desgaste do mecanismo, forças de corte, rugosidade superficial e mudanças microestruturais. Os autores perceberam que, além de reduzir o atrito de contato na interface peça-ferramenta, o resfriamento por nitrogênio líquido melhorou a eficiência da lubrificação, reduzindo o tempo de corte do material. Além disso, em comparação com a fresagem a seco, o resfriamento criogênico causou uma menor rugosidade superficial e proporcionou uma melhora significativa na integridade da superfície onde as alterações microestruturais se mostraram insignificantes (MUSFIRAH; GHANI; HARON, 2017).

De maneira geral, a usinagem do Inconel 718 tem se mostrado como sendo um grande desafio. Diversos estudos mostram que certas características desse material dificultam sua usinabilidade, por exemplo sua elevada resistência ao cisalhamento, a presença de partículas abrasivas em sua microestrutura, sua baixa condutividade térmica e sua tendência a formar rebarbas e arestas postiças.

## 2.2 Microfresamento

Os processos de usinagem têm buscado níveis de qualidade dimensional e geométrica cada vez mais elevados devido à crescente tendência de miniaturização de produtos e componentes (OLIVEIRA, 2019). A fabricação de produtos em escala microscópica é vantajosa devido a sua compacidade, pequena quantidade de material necessária e baixo consumo energético, permitindo o uso de microprodutos na indústria eletrônica, automotiva, telecomunicações, biomedicina, entre outros. Muitos processos tradicionais de usinagem (como torneamento, furação e fresamento) têm passado por contínuas melhorias para se adaptarem à fabricação de peças miniaturizadas (JAIN, 2013).

CÂMARA et al. (2012) definem que, para uma operação de corte ser considerada microusinagem, a ferramenta deve possuir dimensões entre  $1\ \mu\text{m}$  e  $1000\ \mu\text{m}$ . Um aspecto muito relevante dessas operações é que o raio da aresta de corte da ferramenta possui dimensões próximas às da microestrutura do material e da própria espessura do corte, de modo que as teorias usualmente aplicadas à usinagem tradicional não são válidas na microusinagem. Dessa forma, processos de microusinagem envolvem sérias complicações: as forças de corte devem ser as menores possíveis, a rigidez da máquina-ferramenta deve ser alta o suficiente para minimizar erros de usinagem e os processos de acabamento posteriores são mais difíceis. Chae, Park e Freiheit (2006) reiteram, ainda, que a performance de microferramentas é altamente influenciada por pequenas vibrações e por forças excessivas, o que pode ser prejudicial à longevidade da ferramenta e controle de tolerâncias de componentes microusinados.

Segundo CÂMARA et al. (2012), o fresamento em microescala possibilita a confecção de componentes tridimensionais em diversos materiais, desde ligas metálicas a compostos cerâmicos ou poliméricos. Em muitos casos, esses procedimentos de microfresamento são realizados com fresas de topo com duas arestas de corte, de ponta chata ou arredondada, geralmente feitas de carboneto de tungstênio refinado no caso de operações em aço, embora outras geometrias e materiais possam ser utilizados. A espessura do cavaco e o tamanho do grão do material cortado devem ser considerados para a escolha adequada do raio de ponta. Tendo em vista as dificuldades relacionadas ao processo de microfresamento, a maioria dos trabalhos de pesquisa publicados sobre esse assunto envolvem operações em materiais considerados de fácil usinabilidade, tais como aço de baixa dureza e ligas de alumínio ou cobre (CÂMARA et al., 2012). A figura 7 representa um exemplo de fresa de topo de metal duro utilizada em microusinagem de metais.

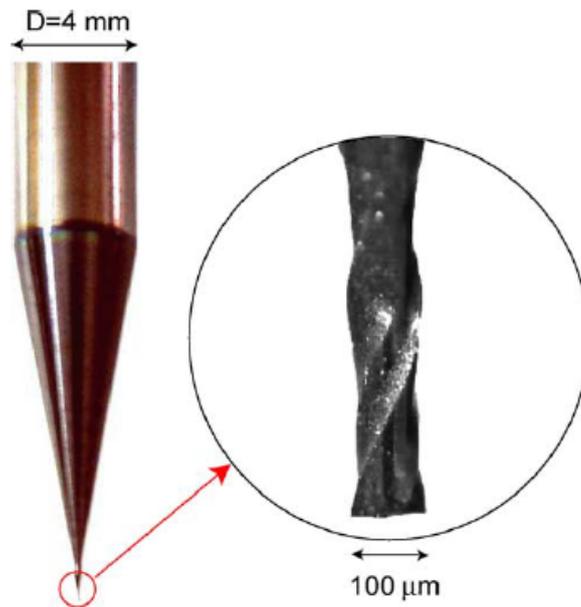


Figura 7 – Microfresa de metal duro com diâmetro de 100  $\mu\text{m}$ . Fonte: Chae, Park e Freiheit (2006).

### 2.2.1 Efeito escala

Na usinagem convencional, a aresta de corte é considerada perfeitamente afiada (sem raio), enquanto que, na escala micro, o raio da aresta  $r_e$  possui um tamanho significativo quando comparado à espessura do cavaco, de modo que o cisalhamento ocorre ao longo do raio. Isso provoca um efeito de *ploughing*, com um ângulo de saída  $\alpha$  muito negativo. Esse fenômeno, representado esquematicamente na figura 8, é conhecido como efeito escala e influencia diretamente parâmetros como forças de corte, formação de cavaco e qualidade superficial de superfícies microusinadas (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

Além disso, conforme Oliveira (2019), a força de corte chega a um pico quando a microferramenta atinge o contorno de grão, devido aos efeitos geométricos de endurecimento, e suas variações ao longo do percurso de avanço podem causar vibrações na ferramenta. O efeito escala é, portanto, um fenômeno intrínseco à microusinagem e é um dos aspectos mais relevantes a serem considerados nesse tipo de operação.

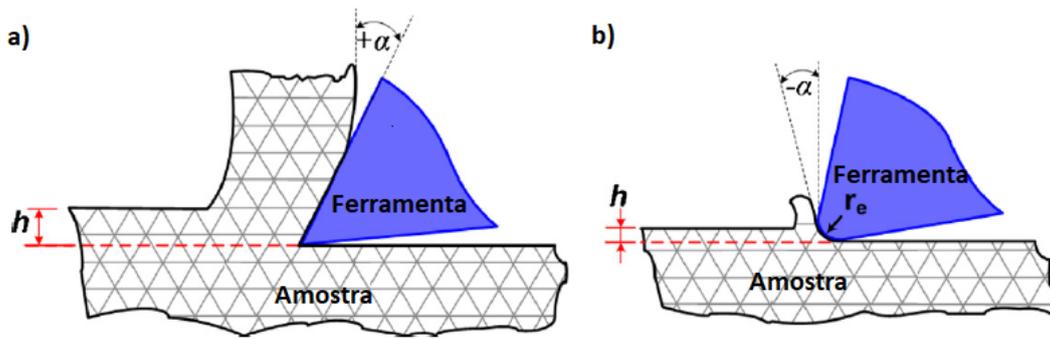


Figura 8 – Efeito do tamanho do raio da aresta de corte em (a) macrousinagem e (b) microusinagem. Fonte: Aramcharoen e Mativenga (2009).

O efeito escala está diretamente relacionado a um aumento não linear da energia específica de corte com a redução da espessura do material cisalhado (CÂMARA, 2014). Isso ocorre porque uma quantidade relativamente grande de material precisa estar no regime plástico para que uma pequena quantidade possa ser removida, resultando em uma grande energia por unidade de volume de material retirado. Caso a espessura de corte seja pequena demais, não há formação de cavaco pois o material apenas se deformará plasticamente, o que significa que existe uma espessura mínima de corte  $h_m$  que deve ser alcançada para que a remoção de material aconteça (figura 9). Essa espessura mínima é muito difícil de ser medida diretamente, embora alguns autores tenham tentado estimá-la através de métodos de elementos finitos ou previsões experimentais (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

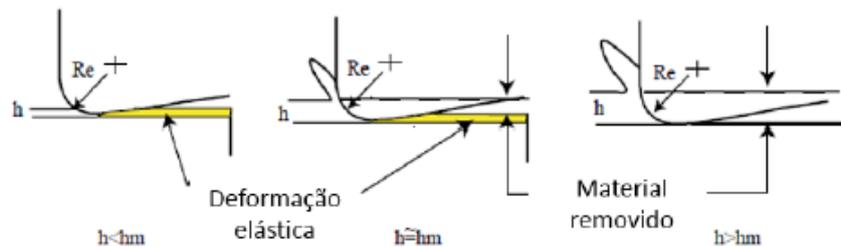


Figura 9 – Efeito da mínima espessura de corte. Adaptado de Chae, Park e Freiheit (2006).

Dib, Duduch e Jasinevicius (2018) desenvolveram um método para determinar a mínima espessura de cavaco analisando sinais de forças de corte no microfresamento da liga de alumínio RSA6061-T6. Os autores observaram que, devido ao efeito *ploughing*, o material pode se acumular nas paredes dos microcanais, atingindo alturas de duas a quatro vezes a espessura mínima, o que resulta em baixa qualidade superficial. O aumento do raio de aresta de corte gerou um aumento na altura das protuberâncias nas paredes do micronal.

Mian, Driver e Mativenga (2011) observaram que a energia específica de corte, espessura da raiz das rebarbas e a rugosidade superficial de peças microusinadas são medidas relevantes do efeito escala em microusinagem. Esses autores utilizaram emissões

acústicas de alta frequência para identificar o fenômeno. Foi constatado que a velocidade de corte é um parâmetro dominante para reduzir a energia específica ou melhorar a qualidade superficial de peças microfresadas.

Em geral, o efeito escala estabelece uma inter-relação entre diversos parâmetros de corte, tais como avanço por dente, penetração de trabalho, ângulo de inclinação da ferramenta, excentricidade da ferramenta e ângulo de folga (OLIVEIRA, 2019). Dessa forma, todos esses parâmetros, juntamente com as propriedades mecânicas do material usinado, estão relacionados com a formação e a geometria de cavacos em microfresamento.

## 2.2.2 Rebarbas em microfresamento

Um dos principais problemas decorrentes do processo de usinagem de uma peça é a presença de rebarbas. Estas podem ser entendidas como ressaltos ou projeções indesejáveis de material para além da aresta da peça, resultantes da deformação plástica, que se mantêm sobre o produto final e possuem volume relativamente pequeno (OLIVEIRA, 2015). De acordo com o mecanismo de formação das rebarbas, Gillespie (1973) as classifica em três principais categorias:

- Rebarba de Poisson: este tipo de rebarba surge devido ao abaulamento lateral dos materiais dúcteis em torno de uma área de compressão até atingir deformação permanente. Esse é o principal tipo de rebarba encontrado em microfresamento e é uma consequência do efeito escala.
- Rebarba de encurvamento (*rollover burr*): essas rebarbas são formadas no final do corte, quando a ferramenta sai da peça. O cavaco é empurrado na direção da saída da ferramenta e não sofre cisalhamento, encurvando-se sobre si e formando uma rebarba em forma de espiral na direção do corte.
- Rebarba de estiramento (*tear burr*): é uma rebarba formada no corte pela ação da ferramenta, provocando um efeito de cunha entre a superfície usinada e o cavaco, onde o material é estirado (ou "rasgado") em vez de cisalhado.

A compreensão dos mecanismos de formação de rebarbas é essencial para sua prevenção e remoção. No caso do microfresamento, esses mecanismos são influenciados pela curvatura da ferramenta devido ao efeito escala. A ponta da microfresa pode ser dividida em duas partes: a superfície de saída e o raio de ponta, ou seja, a linha  $CD$  e o arco  $AC$  representados na figura 10, respectivamente. Quando a ferramenta entra em contato com a peça, tanto a superfície de saída quanto o raio de ponta impelem o material na direção de corte, havendo consideráveis tensões na região de contato. A peça começa a sofrer deformação plástica quando os níveis de tensão são suficientemente altos e o material escoar ao longo da direção de menor resistência. Como o ângulo de saída é negativo, o material se divide em dois escoamentos principais, um acima da superfície

de saída e outro para baixo do raio de ponta, em direção à superfície usinada, existindo portanto um ponto de estagnação. O material que escoou acima do ponto de estagnação se transforma em cavaco e, abaixo do ponto de estagnação, forma rebarbas de Poisson (WU; LI; HE, 2017).

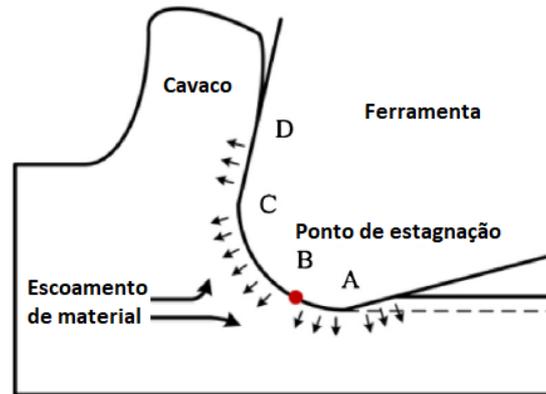


Figura 10 – Formação de rebarbas de Poisson. Adaptado de Wu, Li e He (2017).

Em geral, observa-se que as rebarbas de Poisson são causadas pela estagnação do escoamento de material pelo raio de ponta da ferramenta, de modo que quanto maior o raio de ponta, maiores serão as rebarbas formadas. A formação de rebarbas diminui para um valor mínimo quando a espessura de cavaco se reduz ao mesmo tamanho do raio da aresta de corte. Wu, Li e He (2017) sugerem que uma operação extra de fresamento, posterior ao corte original e na direção oposta a ele, pode remover a maior parte das rebarbas de topo, embora essa solução tenha a desvantagem de duplicar o gasto de tempo e de recursos no processo de fabricação da peça.

As rebarbas em microfresamento são chamadas de rebarbas laterais quando formadas em corte ortogonal e de rebarbas de topo quando formadas na superfície do canal fresado. Materiais mais dúcteis tendem a apresentar maiores rebarbas, uma vez que mais material escoou abaixo do ponto de estagnação. Rebarbas de Poisson são as mais proeminentes no fresamento, especialmente em microescala, e são inevitáveis já que sempre existe um raio de ponta.

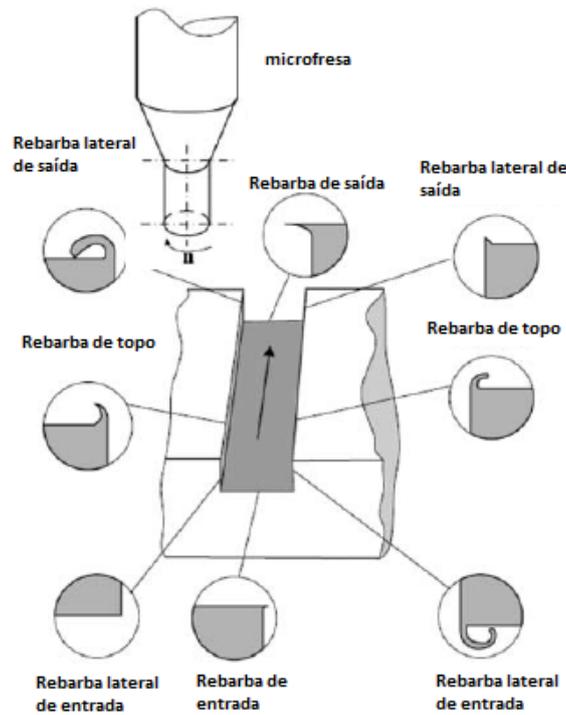


Figura 11 – Tipos de rebarbas encontradas em microfresamento. Adaptado de Wan, Cheng e Sun (2013).

Wan, Cheng e Sun (2013) apresentaram um método para prevenir defeitos superficiais, especialmente rebarbas, no processo de microfresamento. O método proposto consiste em utilizar um material auxiliar que é depositado na peça usinada, formando uma fina camada protetora, de modo que as rebarbas são formadas no material suporte em vez do material da peça. Foram feitos ensaios experimentais na liga de alumínio 7050-T7451 usando dois tipos diferentes de material auxiliar: uma cera e uma liga de baixo ponto de fusão. Os autores perceberam que a cera não trouxe resultados efetivos, pois sua resistência mecânica é muito baixa e não impede a formação de rebarbas no alumínio. A liga metálica auxiliar, rica em *Bi*, *Pb*, *Sn* e *Cd*, foi sobreposta na liga de alumínio no formato de uma placa de 200  $\mu\text{m}$  de espessura. Depois da operação de usinagem, a camada auxiliar foi removida. O processo se mostrou eficiente para diminuir o tamanho das rebarbas na liga de alumínio, porém ainda não é um método usado em escala industrial porque não há um sistema automatizado de deposição dessa camada protetora sobre a peça usinada (WAN; CHENG; SUN, 2013).

Esse mesmo método baseado em uma camada de material auxiliar também foi usado por Kou et al. (2015), os quais defendem que as zonas elásticas, plásticas e de cisalhamento do material usinado são estendidas para o material de suporte, que pode receber as rebarbas no lugar da peça. Os autores explicam que a escolha do material de suporte é a etapa mais crítica para a prevenção de rebarbas. Esse material auxiliar deve ter algumas características indispensáveis, tais como: apresentar resistência alta o suficiente para impedir a deformação plástica na superfície da peça; gerar forças coesivas capazes de impedir a fratura da camada protetora; poder ser facilmente aderido e removido da

superfície da peça; não afetar as propriedades físicas e químicas do material usinado; e apresentar uma boa viabilidade econômica para reduzir os custos de usinagem.

Kou et al. (2015) fizeram ensaios em amostras de cobre berílio, pois considera-se que o material suporte é facilmente aderido a esta liga. O revestimento dos autores foi de adesivo instantâneo à base de  $\alpha$ -etil-cianoacrilato e atingiu  $40\ \mu\text{m}$ . Os parâmetros de corte usados foram  $n = 25000\ \text{rpm}$ ,  $f = 30\ \text{mm/min}$ ,  $V_c = 39,25\ \text{m/min}$  e  $a_p = 40\ \mu\text{m}$ . As ferramentas usadas foram microfresas de metal duro de duas arestas de corte com diâmetro de  $0,5\ \text{mm}$ . Os dados experimentais dos autores mostraram que as rebarbas formadas na camada de suporte são consideravelmente maiores que as da peça usinada, de modo que não houve formação significativa de rebarbas na peça em questão.

Schueler et al. (2010) fizeram uma caracterização do microfresamento de ligas de titânio com fresas extremamente delgadas, de  $\varnothing 48\ \mu\text{m}$ , a fim de minimizar o surgimento de rebarbas. Em ambos os lados das superfícies dos microcanais, foi observada a presença de rebarbas grandes, de cerca de  $15\ \mu\text{m}$  de altura, além de aderência de cavaco no interior dos canais. Os autores detectaram uma grande diferença entre as operações de fresamento concordante e discordante. O fresamento concordante gerou superfícies suaves, enquanto que as superfícies obtidas por fresamento discordante apresentaram qualidades superficiais muito baixas, mesmo com uma ferramenta altamente afiada, com raio de aresta de corte menor do que  $0,1\ \mu\text{m}$ . Houve quebra da ferramenta a um avanço de  $0,57\ \mu\text{m/dente}$ , com grande quantidade de cavaco aderido ao microcanal, como observado na figura 12.

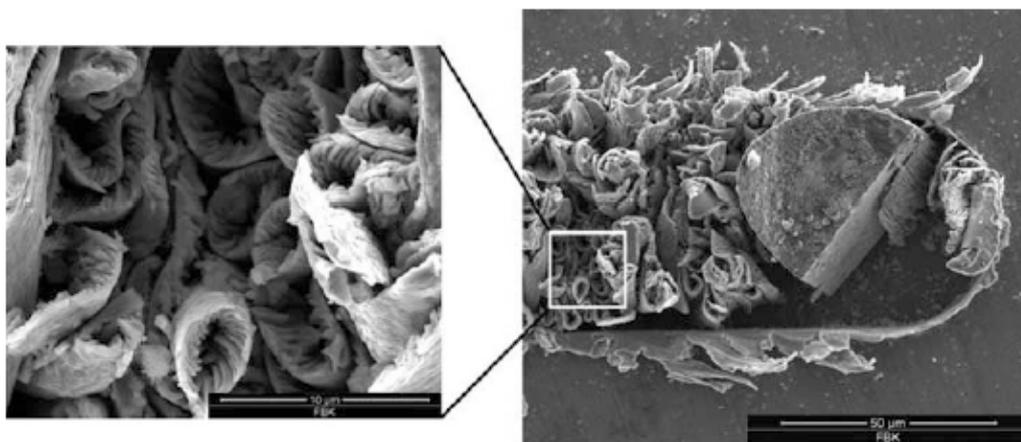


Figura 12 – Rebarbas, adesão de cavaco e quebra da ferramenta em um microcanal de liga de titânio. Fonte: Schueler et al. (2010).

Portanto, é possível observar uma forte tendência de ocorrência de rebarbas em microfresamento. Segundo CÂMARA et al. (2012), a formação de rebarbas é o aspecto mais crítico a ser considerado na qualidade superficial de componentes microfresados, pois os valores de rugosidade não são muito inferiores àqueles observados em fresamento tradicional. Dessa forma, é desejável minimizar o tamanho das rebarbas, e muitas vezes é possível obter tais diminuições através de otimizações nos parâmetros de corte.

## 2.3 Microfresamento em Inconel 718

Tendo em vista a baixa usinabilidade do Inconel 718 e as dificuldades impostas pelos processos de microusinagem, é de se esperar que o microfresamento desse material seja um grande desafio. Além disso, a quantidade de estudos publicados nessa área ainda é relativamente escassa, embora haja algumas publicações recentes visando modelar e otimizar o processo de microfresamento dessa superliga, algumas das quais serão aqui apresentadas.

Fei et al. (2017) propuseram um modelo de simulação por elementos finitos para analisar a formação de cavaco e as forças de corte no microfresamento do Inconel 718. A simulação realizada utilizou o software Deform-3D, incluindo modelagem, definição de propriedades da peça e da ferramenta, controle e execução da simulação e análise. Foi feito um modelo tridimensional da ferramenta, a qual possuía duas arestas de corte, de metal duro, com diâmetro de  $500 \mu\text{m}$  e  $r_e = 5 \mu\text{m}$ . O tamanho da peça era  $400 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ . Seus resultados mostraram que o aumento do avanço por dente ou da profundidade radial de corte, mantendo outros parâmetros fixos, provoca um aumento proporcional nas forças de corte e a remoção de material se torna mais acentuada. Realizando a simulação os autores obtiveram um valor crítico de avanço de  $1,5 \mu\text{m}/\text{dente}$ . Para valores menores que esse, não houve indício de formação de cavaco, apenas de deformação plástica (FEI et al., 2017).

FANG et al. (2020) fizeram um estudo comparativo entre dois diferentes métodos de microusinagem: o microfresamento tradicional e o microfresamento assistido por vibrações ultrassônicas (conhecidos pelas siglas em inglês TMM e UVAMM, respectivamente). O método UVAMM consiste em aplicar vibrações ultrassônicas periodicamente na peça ou na ferramenta com o objetivo de melhorar a qualidade da superfície. Os autores observaram que, no procedimento tradicional, houve acúmulo de material não removido nas laterais do canal e formação de saliências e cavidades indesejadas, de modo que o efeito escala teve uma influência significativa na má qualidade final da superfície do Inconel 718. Já com o método UVAMM, houve uma redução das irregularidades superficiais, o que pode ser evidenciado pelos menores valores de rugosidade em comparação com o método tradicional, conforme observado na figura 13. Além disso, outra observação feita pelos autores é que, em comparação com o TMM, o UVAMM permitiu uma certa supressão das rebarbas. Apesar disso, o menor tamanho encontrado para o comprimento das rebarbas foi de  $36,57 \mu\text{m}$  (FANG et al., 2020).

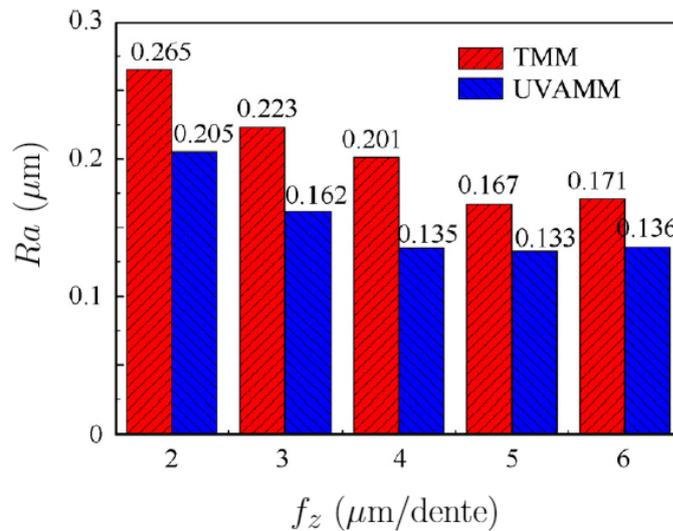


Figura 13 – Variação da rugosidade superficial do Inconel 718 para *TMM* e *UVAMM*. Adaptado de FANG et al. (2020).

Aslantas e ÇIÇEK (2018) investigaram os efeitos de quatro diferentes condições de resfriamento: usinagem a seco; lubrificação por etanol; lubrificação por emulsão de água e óleo; e sistema MQL. Foram feitos canais através de uma microfresa de TiCN com  $\varnothing 600 \mu\text{m}$ . O etanol se provou ineficiente para a lubrificação do Inconel 718 em termos de desgaste da ferramenta, formação de rebarbas e rugosidade superficial. A lubrificação por etanol, apesar de promover o resfriamento da peça, não foi capaz de minimizar os efeitos de desgaste abrasivo da ferramenta no material usinado. Foi possível observar uma acentuada diminuição do diâmetro da ferramenta e a presença das maiores rebarbas na lubrificação com etanol, enquanto que o menor desgaste da ferramenta e o menor tamanho de rebarbas se deu com o sistema MQL. Na condição de usinagem a seco, houve aderência de rebarbas nas paredes do microcanal. Nos métodos diferentes do MQL, foi observado um intenso efeito *ploughing*, de modo que o aumento excessivo do raio de aresta da ferramenta, causado pelo desgaste, intensificou a formação de rebarbas, que chegaram a alcançar mais de  $350 \mu\text{m}$ , conforme pode ser observado na figura 14.

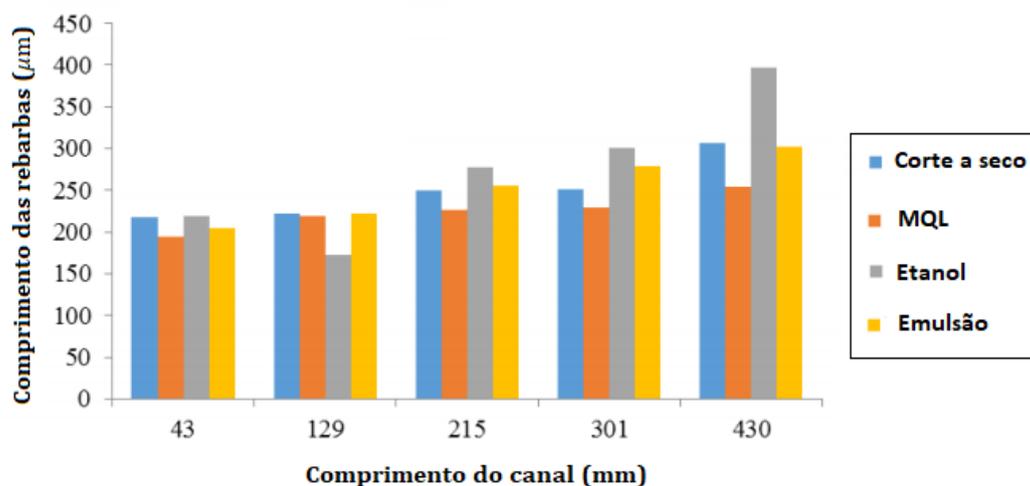


Figura 14 – Variação no tamanho das rebarbas com diferentes condições de lubrificação. Adaptado de Aslantas e ÇIÇEK (2018).

Ucun, Aslantas e Bedir (2013) fizeram uma investigação experimental do efeito do revestimento e da lubrificação no desgaste da ferramenta ao microfresar o Inconel 718. Nos ensaios, foram usadas microfresas de diâmetro  $\mu\text{m}$  e  $r_e = 2 \mu\text{m}$ , aplicando uma velocidade de corte de 100 m/min, um comprimento fresado de 120 mm, os avanços de 1,25  $\mu\text{m}$ , 2,50  $\mu\text{m}$ , 3,75  $\mu\text{m}$  e 5,00  $\mu\text{m}$  e as profundidades de corte de 100  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$ . Os autores usaram os seguintes revestimentos:  $TiAlN + AlCrN$ , carbono tipo diamante (DLC),  $AlTiN$ ,  $TiAlN + WC/C$ , e  $AlCrN$ . Foi observado que o desgaste de flanco devido ao mecanismo abrasivo foi o mais frequente. Observou-se a formação de arestas postiças de corte, com diferentes intensidades dependendo do tipo de revestimento, sendo que os revestimentos de  $DLC$  e o  $TiAlN + WC/C$  foram os mais eficientes para evitar esse problema. Os autores também notaram a presença de fraturas localizadas nas arestas de corte e nas arestas secundárias, causados pela fadiga.

Ucun, Aslantas e Bedir (2013) observaram, ainda, que os níveis de desgaste e de diminuição de diâmetro foram mais brandos nas ferramentas com revestimento em comparação com as não revestidas. Os autores atribuíram isso à alta dureza e baixo coeficiente de atrito dos materiais dos revestimentos. Quanto à lubrificação, os autores usaram o óleo vegetal Coolube 2210 aplicando a técnica MQL com uma vazão de 150 ml/h, que aumentou significativamente a vida da ferramenta em relação ao processo a seco, evitando adesão de cavaco (UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2013).

Em uma outra publicação, Ucun, Aslantas e Bedir (2015) analisaram especificamente a performance do revestimento DLC em relação à ferramenta não revestida. Nesse trabalho, os autores analisaram o desgaste da ferramenta, a rugosidade superficial, as forças de corte e a formação de rebarbas no Inconel 718, usando os mesmos parâmetros do trabalho de Ucun, Aslantas e Bedir (2013). Foi observado que a formação de rebarbas é mínima nos microcanais fabricados com a ferramenta revestida de carbono tipo diamante, o que os autores atribuem à resistência ao desgaste do revestimento. Já nos canais obtidos

com a ferramenta sem revestimento, foi observado aumento do raio de aresta de corte da ferramenta e formação de arestas postizas de corte, com conseqüente aumento no surgimento de rebarbas em distâncias de corte entre 60 mm e 120 mm (UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2015).

Um estudo aprofundado de microfresamento em Inconel 718 foi realizado por Oliveira (2019), que executou ensaios experimentais variando velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte e aplicação de fluido de corte. Foram usadas fresas de metal duro revestidas de nitreto de alumínio e titânio, com diâmetro 400  $\mu\text{m}$ , comprimento de corte 800  $\mu\text{m}$  e duas arestas de corte de raio  $(1,1 \pm 0,1) \mu\text{m}$ . A autora usou como parâmetros de saída a qualidade da superfície usinada, a rugosidade  $R_a$ , altura das rebarbas, desgaste da microfresa, sinais de acústica e vibrações, forças de corte e geometria do cavaco. A autora observou que a presença de fluido de corte pode aumentar em até 1000% o comprimento usinado até o fim da vida da ferramenta, o que demonstra um desgaste muito elevado na operação a seco, que resultou em arredondamento da aresta de corte, destacamento do revestimento e quebra da ponta de corte. Quanto à formação de rebarbas, constatou-se que não há formação de rebarbas de fundo em ensaios com fluido de corte, embora as rebarbas de saída apresentem grandes dimensões, até 50% maiores que a profundidade do canal, conforme observado na figura 15.

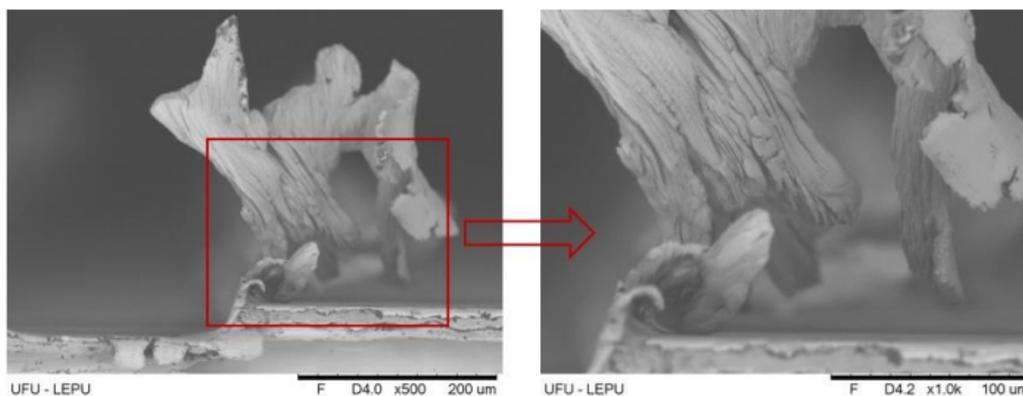


Figura 15 – Rebarbas de grandes dimensões em um microcanal de Inconel 718. Fonte: Oliveira (2019).

Percebe-se que a presença de rebarbas de grandes dimensões é recorrente no microfresamento do Inconel 718, as quais são frequentemente difíceis de evitar. Assim sendo, faz-se relevante que sejam aplicados processos posteriores à usinagem para que essas rebarbas sejam removidas.

## 2.4 Métodos de rebarbação

A definição do que seria uma aresta livre de rebarbas pode variar de acordo com o nível de qualidade desejado pela indústria. No entanto, sabe-se que as rebarbas represen-

tam um grande obstáculo no acabamento de peças, uma vez que a qualidade das arestas influencia diretamente em aspectos como desempenho, segurança, custo e aparência do produto manufaturado. Segundo Gillespie (1999), alguns dos problemas que podem ser ocasionados por rebarbas e arestas inadequadamente acabadas incluem: encaixes com interferência em montagens; mecanismos emperrados; atrito indesejável; excessivas concentrações de tensão; turbulência e escoamentos não-laminares; medições dimensionais imprecisas; entre outros.

Tendo em vista esses problemas, é evidente que a remoção de rebarbas visando a usinagem de acabamento é de grande interesse econômico. Ao processo de eliminação das rebarbas resultantes do processo de fabricação de uma peça dá-se o nome de rebarbação ou rebarbagem. Diversos processos de rebarbação podem ser aplicáveis, a depender das propriedades físicas da peça que se deseja rebarbar. Além disso, a rebarbação acarreta custos de produção e pode ser considerada um trabalho sem valor agregado (BOUZID, 2017).

Gillespie (1999) classifica os processos de rebarbação mais utilizados em quatro grandes grupos: rebarbação mecânica, térmica, química e elétrica. Esse autor também fez uma estimativa do número de indústrias que faziam uso dos processos de acabamento ou remoção de rebarbas mais comuns ao redor do mundo no fim do século XX, conforme pode ser observado na tabela 2.

Tabela 2 – Processos de rebarbação mais utilizados no mundo. Adaptado de Gillespie (1999).

<b>Processo de rebarbação</b>	<b>Quantidade no mundo (1997)</b>
Rebarbação manual	800000
Rebarbação por escovação	100000
Lixamento	50000
Jato abrasivo	40000
Vibroacabamento	30000
Corte mecanizado	20000
Tamboreamento rotativo	16000
Tamboreamento centrífugo	2000
Mandrilhamento	1200
Rebarbação eletroquímica	1200
Rebarbação por jato d'água	800
Rebarbação térmica	700

Difícilmente é possível obter, de maneira viável, altas qualidades de acabamento para diferentes tipos de peça usando um único processo de rebarbação. Por isso, é essencial que seja escolhido o método de rebarbação mais apropriado para cada situação. Entre as diversas opções de tecnologias de rebarbagem, faz-se necessário escolher a mais adequada para a aplicação desejada, uma vez que cada método tem suas vantagens e desvantagens.

O processo de rebarbagem mais utilizado no mundo ainda é a rebarbação manual, ou seja, qualquer atividade que envolva a remoção de rebarbas por meio do manejo direto de ferramentas pelo operador, em lugar de usar uma máquina ou processos automatizados. Conforme Gillespie (2003), esse processo é o mais versátil por diversos motivos, entre os quais pode-se citar:

- as rebarbas podem ser difíceis de alcançar por outros processos que não sejam manuais;
- permite que o operador use sua criatividade para solucionar problemas de ineficiência, o que não ocorre com o uso de máquinas;
- tamanhos variáveis de rebarbas dificulta o uso de outros processos;
- a rebarbação mecanizada pode gerar novas rebarbas menores;
- os equipamentos e mão de obra requeridos são baratos;
- a rebarbação manual pode ser executada enquanto outras operações de usinagem ocorrem dentro do ciclo de fabricação (GILLESPIE, 2003).

No entanto, também há muitos inconvenientes na rebarbagem manual, por exemplo o alto tempo gasto, a necessidade de algumas peças serem retrabalhadas, os gastos com saúde e segurança do operário, a irregularidade no acabamento entre diferentes peças, entre outros. Esses problemas, muitas vezes, precisam ser contornados uma vez que os processos manuais são difíceis de serem substituídos, especialmente nos casos de peças complexas ou excessivamente deformáveis (GILLESPIE, 2003). Geralmente, as operações manuais de rebarbação são realizadas a seco, com a peça apoiada sobre uma morsa, utilizando uma ferramenta adequada. Diversas ferramentas podem ser usadas nessas operações, como por exemplo rebarbadores similares ao representado na figura 16, além de facas, lixas de metal ou papel, escareadores, escovas, pedras de polimento, entre outros.

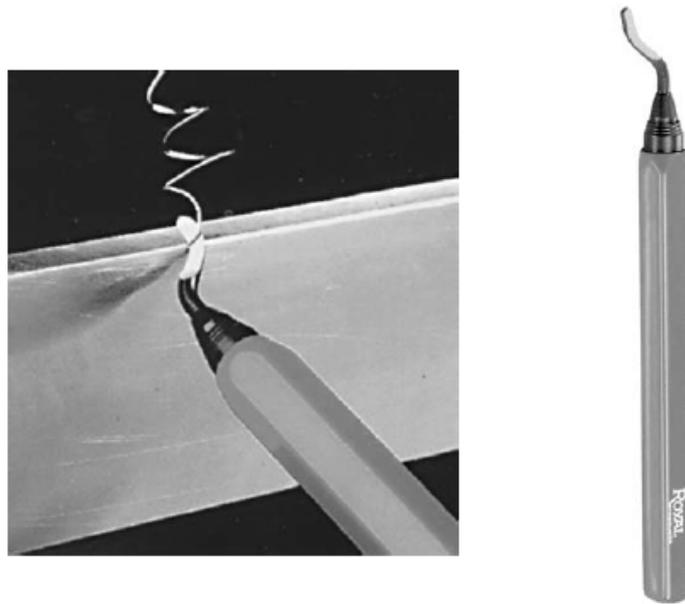


Figura 16 – Exemplo de rebarbador manual. Adaptado de Gillespie (2003).

O acabamento superficial de peças produzidas em série pode ser feito através de operações de tamboreamento centrífugo ou por tamboreador vibratório, sistema conhecido como vibro-acabamento. Nesses tipos de processo, as peças são inseridas em um recipiente, geralmente uma máquina vibratória ou tambor rotativo, que está repleto de pequenos *chips* ou mídias abrasivas que podem ser de diversos materiais e formatos. Quando o recipiente vibra ou gira, a fricção das mídias com as peças permite polir, rebarbar e arredondar cantos. É um processo que permite o acabamento de uma grande quantidade de peças simultaneamente, entretanto o custo do equipamento é elevado e o processo pode ser muito ruidoso (BOUZID, 2017). A representação esquemática de um tamboreador vibratório é apresentada da figura 17.

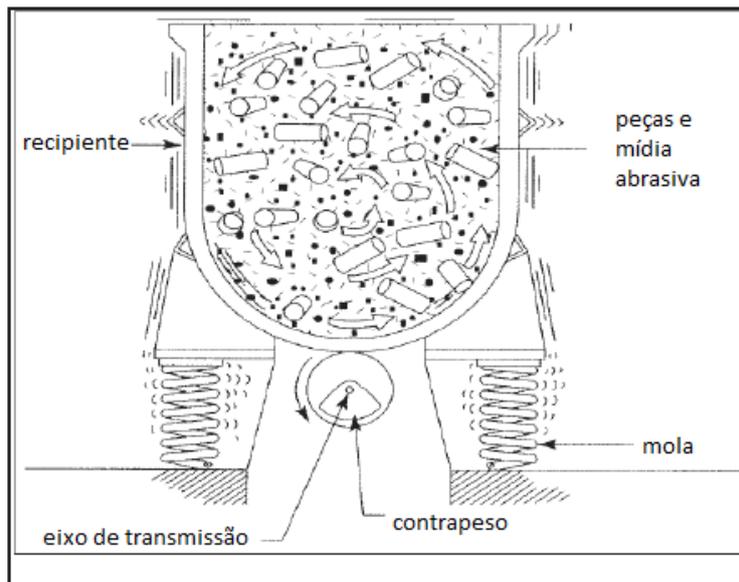


Figura 17 – Acabamento superficial por tamboreamento vibratório. Adaptado de BOUZID (2017).

Outro sistema bastante utilizado na indústria é a escovação, especialmente para produção em série de peças com rebarbas volumosas. Muitas indústrias metalúrgicas possuem escovas mecanizadas usadas para rebarbar, limpar, polir ou texturizar peças a um custo relativamente baixo, com a vantagem de não produzirem novas rebarbas durante a operação (GILLESPIE, 1999).

A remoção de rebarbas também pode ser feita por cortes mecanizados de máquinas-ferramenta tradicionais, como é o caso do mandrilhamento em superfícies de revolução. Algumas empresas desenvolvem máquinas destinadas tanto à usinagem de desbaste quanto de acabamento. Essas máquinas podem possuir diferentes níveis de automatização. O uso de máquinas-ferramenta comandadas numericamente (máquinas CNC) maximiza o tempo de serviço dos equipamentos, uma vez que a rebarbação se dá imediatamente após o desbaste da peça. Como qualquer outro método, a rebarbagem comandada numericamente apresenta inconvenientes, entre os quais pode ser citado o custo elevado do maquinário e da mão de obra associada (TIABI, 2010).

Algumas das formas menos convencionais de remoção de rebarbas incluem processos elétricos, químicos ou térmicos. Em locais de difícil acesso, como interseções de furos e peças de alta precisão, pode-se usar, por exemplo, a rebarbação eletroquímica. Nesse processo, as rebarbas podem ser dissolvidas em poucos segundos, sem afetar o restante da peça, graças à passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos separados por um líquido dielétrico. Já a rebarbação térmica é o processo mais rápido de rebarbação, no qual a peça é submetida a uma combustão durante um intervalo de tempo muito curto dentro de uma câmara de pressão, de modo que as rebarbas são completamente oxidadas em milésimos de segundo (GILLESPIE, 1999).

O jateamento abrasivo é uma operação que consiste em propulsionar um fluxo

de líquido ou ar comprimido com partículas abrasivas contra uma superfície em alta velocidade. Esse processo é mais adequado para a remoção de rebarbas de pequenas dimensões, uma vez que permite removê-las sem provocar o arredondamento das arestas da peça. Diversas arestas da mesma peça podem ser rebarbadas simplesmente mudando a orientação do jato abrasivo e o volume de material removido pode ser controlado através do tempo de exposição e a pressão do jato. Como limitação dessa tecnologia, podemos citar o fato de que, geralmente, apenas uma peça pode ser rebarbada de cada vez. Além disso, a peça pode ser contaminada, suas superfícies podem ser modificadas e é um processo difícil de ser feito manualmente de maneira precisa, sendo necessárias tecnologias de automação. O jateamento abrasivo não é recomendado para remoção de rebarbas muito volumosas (TIABI, 2010); (BOUZID, 2017).

Além do jateamento, diversos outros processos de abrasão, tais como polimento, lixamento e retificação são amplamente utilizados em escala industrial. Diferentemente das operações executadas com arestas de geometria definida, na usinagem por abrasão a remoção de cavaco se dá por meio da ação de grãos abrasivos, ou seja, partículas não-metálicas de alta dureza, cujas arestas apresentam formas e orientações irregulares. Equipamentos abrasivos como lixas e rebolos estão presentes em praticamente qualquer oficina manufatureira graças à sua grande flexibilidade, conveniência, preço baixo e ampla variedade de formas e dimensões. Essas ferramentas, que podem ser usadas para acabamento de superfície ou remoção de rebarbas, geralmente apresentam óxido de alumínio, carboneto de silício ou dióxido de zircônio como material abrasivo (TIABI, 2010). Dependendo da ferramenta, essas partículas abrasivas podem vir aderidas em folhas ou esteiras (lixas), discos ou rebolos (figura 18), cones de chanfrar, entre outros.

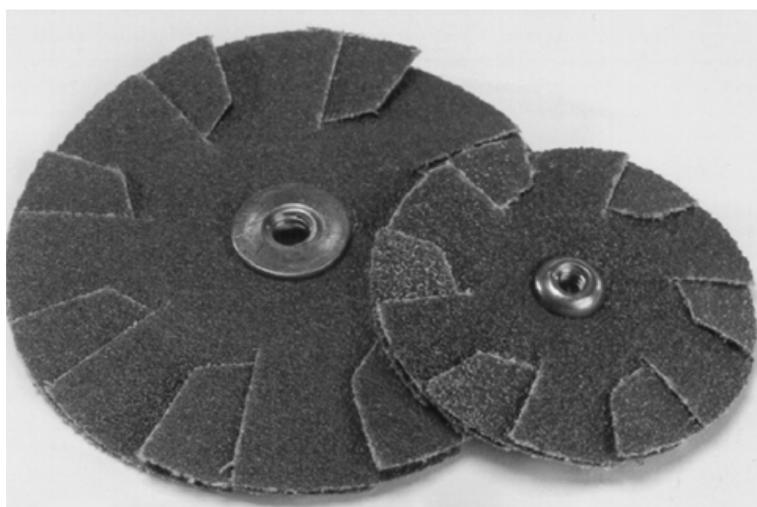


Figura 18 – Discos abrasivos utilizados para retificação. Adaptado de Gillespie (1999).

Percebe-se, de maneira geral, que os métodos de rebarbação manuais e abrasivos são os mais frequentemente usados industrialmente graças ao seu baixo preço, simplicidade, rapidez de execução e versatilidade. Esses processos também possuem desvantagens, tais como a criação de tensões residuais, a liberação de poeira e a baixa duração da vida

da ferramenta (GILLESPIE, 2003). Ainda assim, o uso desses métodos simples e baratos costuma ser mais economicamente vantajoso; o uso de tecnologias mais caras no processo de rebarbação agrega pouco ou nenhum valor ao produto final, o que geralmente não justifica um gasto elevado com maquinário.

## 2.5 Rebarbação em microusinagem

Em contraste com a macrousinagem, a remoção de rebarbas em microusinagem é particularmente difícil (KHAN et al., 2019). Os métodos de rebarbação comumente usados em macroescala, muitas vezes, não são adequados para microcomponentes, uma vez que essas técnicas podem afetar a precisão dimensional da peça e possivelmente danificá-la. Por isso, faz-se necessária a busca por técnicas eficientes de remoção de rebarbas em microusinagem; alguns trabalhos de pesquisa relacionados a esse tema serão aqui apresentados.

Kienzler, Deuchert e Schulze (2010) investigaram a viabilidade de diferentes alternativas para reduzir ou eliminar rebarbas de matrizes usadas para microinjeção de pós metálicos. Os autores compararam o microfresamento com as técnicas de tratamento com granalhas, *micro peening* e *ultrasonic wet peening*, na remoção de rebarbas no aço 30CrMo6. As amostras foram preparadas produzindo microcanais de 5 mm de comprimento e 100  $\mu\text{m}$  de profundidade, utilizando uma fresa de metal duro com  $\varnothing 500 \mu\text{m}$ , com velocidade de rotação de 30000 rpm e avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ . Foram obtidas rebarbas de cerca de 45  $\mu\text{m}$  de altura. No experimento de rebarbação por microfresamento, os microcanais foram retrabalhados pelos autores, a fim de remover as rebarbas. O procedimento foi feito ao passar a microfresa na direção paralela ao microcanal, a uma distância de 5  $\mu\text{m}$  da superfície e com uma sobreposição de 50% da largura. Os autores observaram que esse processo removeu as rebarbas de topo, porém foi acompanhado da geração de novas rebarbas na direção paralela à superfície trabalhada (KIENZLER; DEUCHERT; SCHULZE, 2010).

O processo de *micro peening* consiste em um jato de granalhas - partículas redondas microscópicas - que é aplicado sobre a peça por um bocal. Já no processo de *ultrasonic wet peening*, a peça é colocada em uma suspensão aquosa de partículas abrasivas, onde ondas ultrassônicas são usadas para a cavitação de bolhas, cujos microjatos provocam a aceleração das granalhas. Esses dois métodos consistem em provocar a colisão das granalhas contra a superfície do material trabalhado, de modo a gerar pequenas deformações plásticas e tensões de compressão induzidas na camada superficial. Embora esses tipos de processos sejam normalmente usados como tratamentos para melhorar a resistência à fadiga das peças, Kienzler, Deuchert e Schulze os usaram a fim de diminuir as rebarbas das amostras de aço 30CrMo6. No experimento de *micro peening*, que foi feito com granalhas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , os autores observaram uma diminuição na altura das rebarbas

de 35  $\mu\text{m}$  para cerca de 10  $\mu\text{m}$ , conforme observado na figura 19. Já no método *ultrasonic wet peening*, conforme observado na figura 20, boa parte das rebarbas foram removidas com sucesso após a aplicação do processo por 21 min. A boa qualidade final por esse método se deve ao fato de que as partículas no fluido são aceleradas em todas as direções (KIENZLER; DEUCHERT; SCHULZE, 2010).

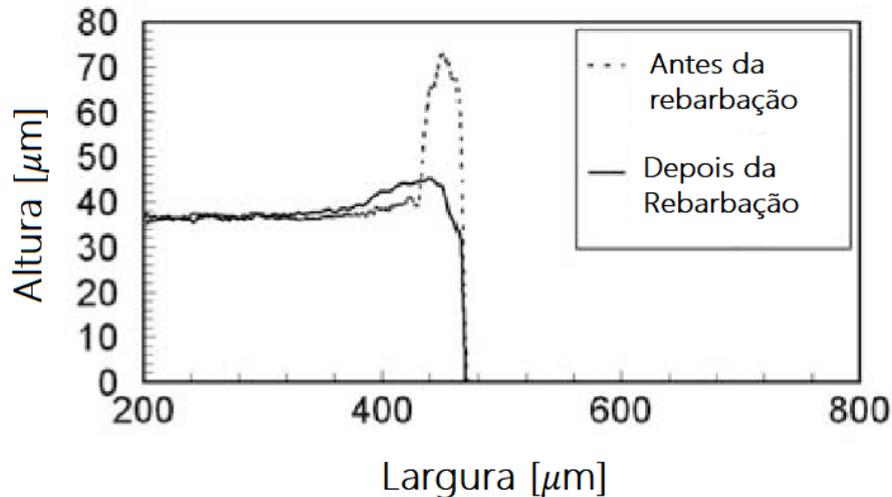


Figura 19 – Medição do tamanho de rebarba antes e depois da rebarbação por *micro peening*. Adaptado de Kienzler, Deuchert e Schulze (2010).

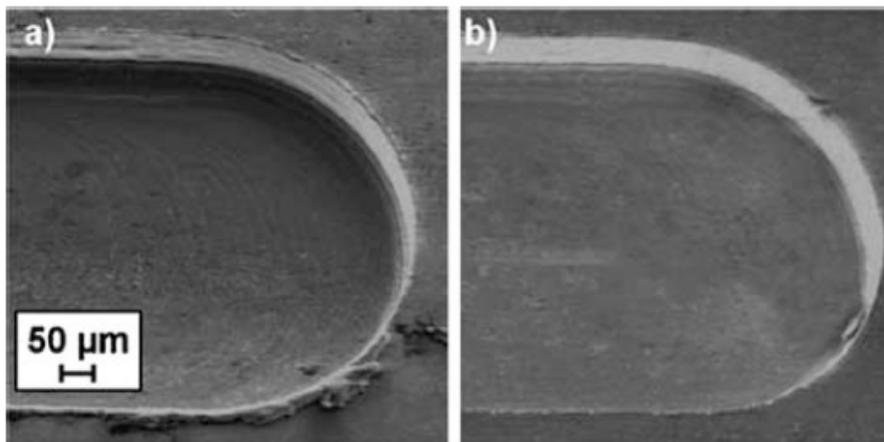


Figura 20 – Detalhe de um microcanal antes (a) e depois (b) de passar por *ultrasonic wet peening*. Fonte: Kienzler, Deuchert e Schulze (2010).

Lee e Dornfeld (2001) tentaram encontrar uma maneira efetiva de automatizar a rebarbação de componentes de precisão. Os autores escolheram a rebarbação a laser a fim de evitar o contato direto entre a peça e a ferramenta e seus efeitos posteriores de deterioração por vibrações e desgaste. O método escolhido consiste na aplicação de um feixe de raio laser para remover rebarbas. Foi usado um laser 1500 W de  $\text{CO}_2$  de onda contínua com raio de 0,06 mm no ponto focal. Para fins comparativos, foi feita a rebarbação mecânica e a laser de duas amostras semelhantes, uma de aço inoxidável 304 e outra de aço AISI 1045. Os valores de profundidade de corte alcançados em cada método estão representados na tabela 3.

Tabela 3 – Perfis de corte obtidos por rebarbação mecânica e a laser. Adaptado de Lee e Dornfeld (2001).

	Aço Inoxidável 304 Espessura de rebarba aproximada: 0,20 mm		Aço AISI 1045 Espessura de rebarba aproximada: 0,15 mm	
	Rebarbação mecânica	Rebarbação a laser	Rebarbação mecânica	Rebarbação a laser
Largura de corte	0,30 mm	0,10 mm	0,25 mm	0,07 mm
Profundidade de corte	0,30 mm	0,25 mm	0,25 mm	0,21 mm

Conforme observado, uma menor quantidade de material é removida com o laser, o que é uma vantagem em termos de controle e precisão. A rebarbação mecânica apresenta também o problema de não ser uniforme, especialmente quando as rebarbas são irregulares. Além disso, em comparação com outros processos térmicos, a quantidade de calor fornecida pelo laser é próxima ao mínimo necessário para fundir o material da peça, de modo que são menores os efeitos metalúrgicos sobre a zona termicamente afetada, ou seja, a região próxima à área de corte na qual as propriedades do material são alteradas devido à elevada temperatura (LEE; DORNFELD, 2001).

Mathai e Melkote (2012) realizaram uma caracterização experimental da taxa de rebarbação por abrasão de canais obtidos por microfresamento. Uma escova giratória de nylon foi aplicada sobre o material na presença de uma pasta abrasiva, conforme a figura 21. Os autores escolheram esse método de rebarbação devido à sua simplicidade e baixo custo. Os parâmetros considerados no estudo foram a granulometria, o tipo de abrasivo e a velocidade de rotação. Foram usados abrasivos de *SiC* e de diamante, com granulometrias de  $1,25 \mu\text{m}$  e  $3 \mu\text{m}$ . Foram escolhidas três velocidades para o experimento: 5000 rpm, 10000 rpm e 15000 rpm. Os ensaios foram realizados em amostras de liga de cobre 110 e de aço ferramenta tipo A2, nas quais foram fabricados microcanais de 5 mm de comprimento e  $50 \mu\text{m}$  de profundidade através de uma fresa de topo de  $\varnothing 500 \mu\text{m}$ , de metal duro, a uma rotação de 60000 rpm e taxa de avanço de 500 mm/min. Foram feitos os ensaios de rebarbação com um tempo fixo de 65 s, de modo que a diferença de altura das rebarbas foi mensurada para que a taxa de redução de rebarba pudesse ser calculada. A escova usada para a rebarbação tinha diâmetro de 3,5 mm, com cerdas de diâmetro  $50 \mu\text{m}$ , e operou a uma velocidade de 300 mm/min.

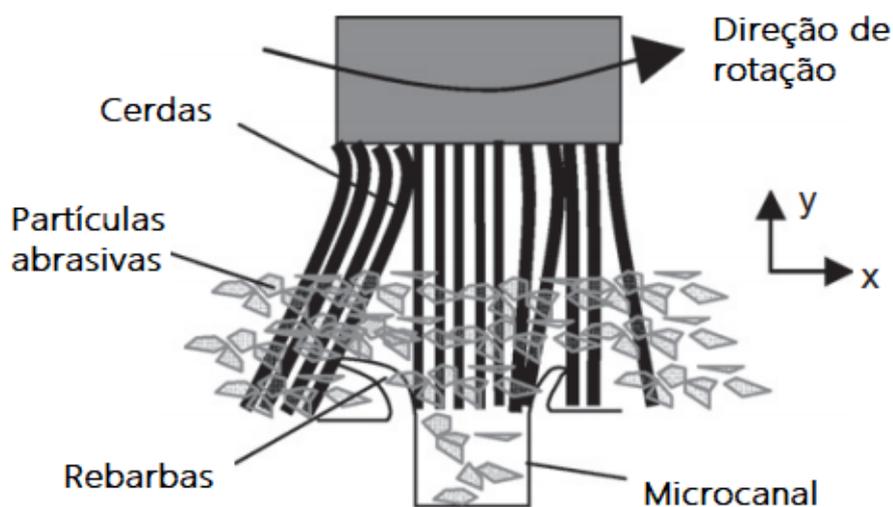


Figura 21 – Representação esquemática da rebarbação por escovação assistida por pasta abrasiva. Adaptado de Mathai e Melkote (2012).

Após os ensaios, Mathai e Melkote (2012) utilizaram um modelo de regressão linear para ajustar as taxas de rebarbação e quantificar o efeito do tamanho inicial das rebarbas, bem como estimar o tempo necessário para a remoção completa das mesmas. Os autores concluíram que a taxa de rebarbação é proporcional à altura inicial das rebarbas, com uma razão de proporcionalidade quase constante para as condições estudadas. Foi notado que as rebarbas possuem uma tendência a dobrar ou quebrar quando atingem aproximadamente a metade de sua altura inicial. A taxa de rebarbação aumenta com a velocidade de rotação da escova, sendo maior para o abrasivo de diamante do que o *SiC*. De maneira geral, esse estudo mostrou que a rebarbação por escova pode efetivamente remover grandes rebarbas em canais obtidos por microfresamento dentro de poucos minutos, com melhoria da qualidade superficial, conforme se nota na figura 22 (MATHAI; MELKOTE, 2012).

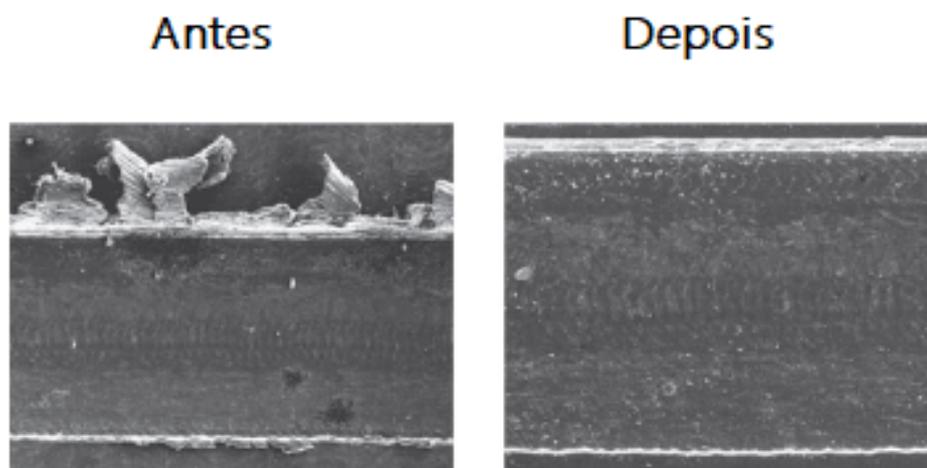


Figura 22 – Microcanal de aço ferramenta A2 antes e depois da rebarbação com abrasivo de *SiC*, de 3  $\mu\text{m}$ , a 15000 rpm. Adaptado de Mathai e Melkote (2012).

Em um outro trabalho, Mathai, Melkote e Rosen (2013) conduziram experimentos para estudar a mecânica da remoção de material durante a rebarbação de microcanais em amostras de *NiTi*, novamente usando escovas de nylon impregnadas de material abrasivo. Os canais, de 6 mm de comprimento, foram obtidos através de uma microfresa de duas arestas de corte, de diâmetro 500  $\mu\text{m}$  a 60000 rpm e avanço de 1  $\mu\text{m}/\text{dente}$ . Os autores realizaram a rebarbação usando os mesmos parâmetros do trabalho de Mathai e Melkote (2012). Foi possível perceber que, na escovação de superfícies planas, parte do material é removida na forma de cavaco pelas partículas abrasivas e outra parte é deformada, sendo empurrada para formar microrrebarbas. As microrrebarbas, posteriormente, sofrem fratura devido às forças iniciais de contato das cerdas subsequentes da escova. Foi observado que a remoção das rebarbas ocorre em duas fases: a fase I envolve fratura por fadiga das rebarbas mais longas e delgadas do topo do microcanal; e a fase II envolve a remoção de material na forma de pequenas lâminas, ao passo que as trincas formadas na fase I e as novas trincas formadas durante a escovação se propagam ao longo da rebarba. Os autores obtiveram sucesso em remover as rebarbas dentro de 12 min para um canal de 6 mm de comprimento com uma mudança na espessura da amostra de menos de um micrômetro (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).

## 3 Materiais e Métodos

### 3.1 Caracterização do material

O procedimento experimental foi conduzido em quatro amostras da superliga de níquel Inconel 718 na forma envelhecida. As amostras possuem as seguintes dimensões: 15 mm de largura, 20 mm de comprimento e 15 mm de altura. A composição química das amostras foi obtida por Oliveira (2019) através de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e comparada com a composição teórica fornecida por Reed (2006), conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Composição química do Inconel 718. Adaptado de Oliveira (2019).

<b>Elemento</b>	<b>% em massa obtida por Oliveira (2019)</b>	<b>% em massa segundo Reed (2006)</b>
Carbono	5,588	0,04
Alumínio	0,497	0,50
Titânio	0,860	0,90
Cromo	16,899	19,00
Ferro	19,079	18,50
Níquel	49,000	50,66
Nióbio	4,582	5,10
Molibdênio	3,495	5,30

### 3.2 Microfresamento das amostras

Sabe-se que diversos parâmetros influenciam a formação de rebarbas durante o microfresamento, podendo-se ressaltar: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, dimensões da ferramenta, revestimento da microfresa e uso de fluido de corte. Assim, este item tem como objetivo detalhar a fabricação dos microcanais que serão utilizados no estudo da rebarbação.

As amostras utilizadas neste trabalho foram obtidas por Oliveira (2019), que produziu microcanais nas amostras de Inconel 718 através de uma microfresadora CNC de três eixos, com resolução de posicionamento de 0,1  $\mu\text{m}$  e velocidade de avanço máxima de

1000 mm/min, modelo Mini-mill/GX, da fabricante Minitex Machinery Corporation. A máquina usada é equipada com um motor elétrico Nakanishi EM-3060, com controle de rotação de 60000 rpm e o sistema é controlado pelo software Mach3Mill.

As ferramentas de corte utilizadas pela autora são do modelo MS2MSD0040, da fabricante Mitsubishi, mostrado na figura 23. Elas possuem diâmetro de  $400 \mu\text{m}$ , com erro máximo de 5% de resolução, comprimento de corte de  $800 \mu\text{m}$  duas arestas de corte com raios de  $(1,1 \pm 0,1) \mu\text{m}$ . As microfresas são fabricadas em metal duro e possuem revestimento de  $(Al, Ti)N$ . Foi usada uma nova microfresa para a fabricação de cada amostra, ou seja, o critério de fim de vida das microferramentas foi o comprimento usinado de 180 mm (12 canais de 15 mm cada).

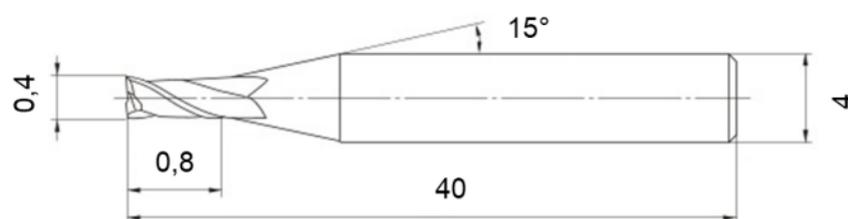


Figura 23 – Dimensões em milímetros da microfresa usada na usinagem das amostras, do fabricante Mitsubishi.

A operação de microfresamento se deu com aplicação do fluido de corte integral Coolube 2210EP do fabricante Unist. Foram realizados 12 canais em cada amostra, com espaçamento de 1,5 mm entre centros, cada um com comprimento de 15 mm e profundidade de corte de  $40 \mu\text{m}$ , conforme observado na figura 24. Foram feitos um ensaio e uma réplica para cada uma das duas velocidades de rotação, uma de 11000 rpm e outra de 20000 rpm, totalizando quatro amostras. Os parâmetros de corte usados pela autora estão apresentados na tabela 5.

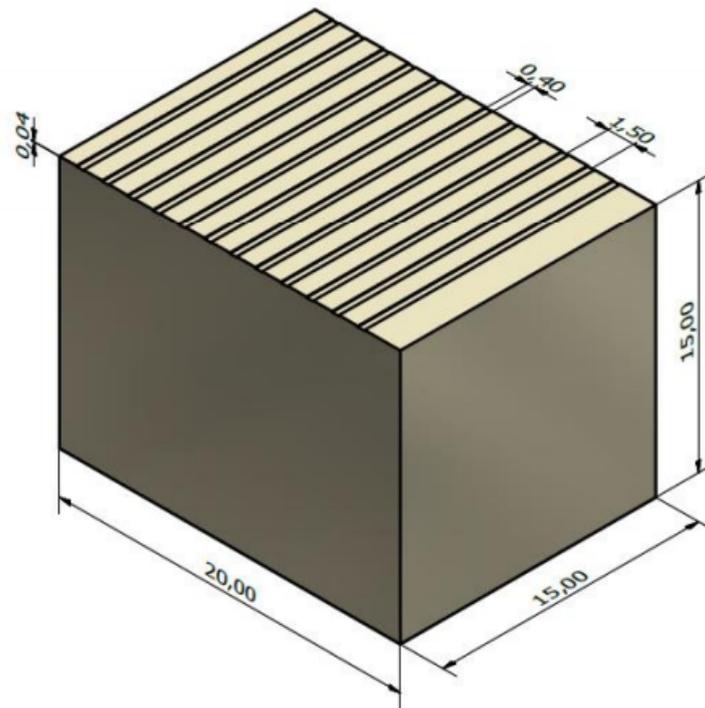


Figura 24 – Esquema da geometria e dimensões dos canais nas amostras de Inconel 718. Dimensões em milímetros. Fonte: Oliveira (2019).

Tabela 5 – Parâmetros de corte usados por Oliveira (2019) no microfresamento das amostras.

Amostra	Rotação $n(rpm)$	Velocidade de corte $V_c(m/min)$	Avanço por dente $f_z (\mu m)$	Profundidade de corte $a_p (\mu m)$	Penetração de trabalho $a_c (\mu m)$
1	11000	13,8	5,0	40	400
2	20000	25,1			
3	11000	13,8			
4	20000	25,1			

### 3.3 Rebarbação das amostras

Tendo em vista as dificuldades de acesso a métodos de rebarbação menos convencionais, tais como o *micro peening* usado por Kienzler, Deuchert e Schulze (2010) ou a rebarbação a laser usada por Lee e Dornfeld (2001), optou-se pelo uso de métodos abrasivos. Estes métodos, conforme Gillespie (2003), são vastamente usados em quase todas as indústrias do mundo devido a sua simplicidade, versatilidade e baixo custo, e podem ser realizados manualmente. Além disso, nos trabalhos de Mathai e Melkote (2012) e Mathai, Melkote e Rosen (2013), a rebarbação por abrasão se mostrou eficiente para remover grande parte das rebarbas em canais obtidos por microfresamento no aço A2 e no *NiTi*.

Dessa forma, no presente trabalho, foi utilizado o método de rebarbação abrasiva por meio de lixas. Foram usadas lixas de carbeto de silício com as seguintes granulometrias: 800, 1200, 2000 e 3000. A operação de rebarbação se deu através de uma lixadeira manual roto-orbital Pantec Polipan 2 (figura 25), disponível no Laboratório de Materiais e Metalurgia da Universidade de Brasília. As amostras foram lixadas com rotação de 120 rpm durante um intervalo de 30 s, variando-se a granulometria da lixa. As amostras foram posicionadas em um diâmetro de aproximadamente 10 cm a partir do eixo de rotação da máquina. O posicionamento foi feito de maneira que os microcanais ficassem tangentes ao círculo descrito pela lixa, pois dessa forma evita-se que as partículas removidas danifiquem a superfície da amostra. A tabela 6 mostra os parâmetros de rebarbação usados no ensaio. Um estudo feito com esses parâmetros encontra-se no apêndice A.



Figura 25 – Lixadeira utilizada no ensaio de rebarbação.

Tabela 6 – Parâmetros de rebarbação.

Amostra	Granulometria da lixa	Tempo de lixamento	Rotação da lixa
Ensaio 11000 rpm	800	30 s	120 rpm
Réplica 11000 rpm	1200		
Ensaio 20000 rpm	2000		
Réplica 20000 rpm	3000		

### 3.4 Variáveis de saída

Considerando a dificuldade de obtenção do desgaste de microfresas, diversos autores têm optado pela avaliação da amostra para quantificar o desgaste, seja em forma da qualidade superficial, seja com a medição indireta do desgasta através das dimensões do canal. Segundo Alhadeff et al. (2019), medir a diminuição da largura do canal usinado é um método eficiente para a medição do desgaste da ferramenta em microfresamento, além de ter a vantagem de não precisar interromper o corte para medir o diâmetro da fresa. No entanto, a medição indireta das dimensões do canal pode ficar comprometida pela presença de rebarbas, as quais podem dificultar uma maior precisão, conforme mostrado, através da seta vermelha, na figura 26.

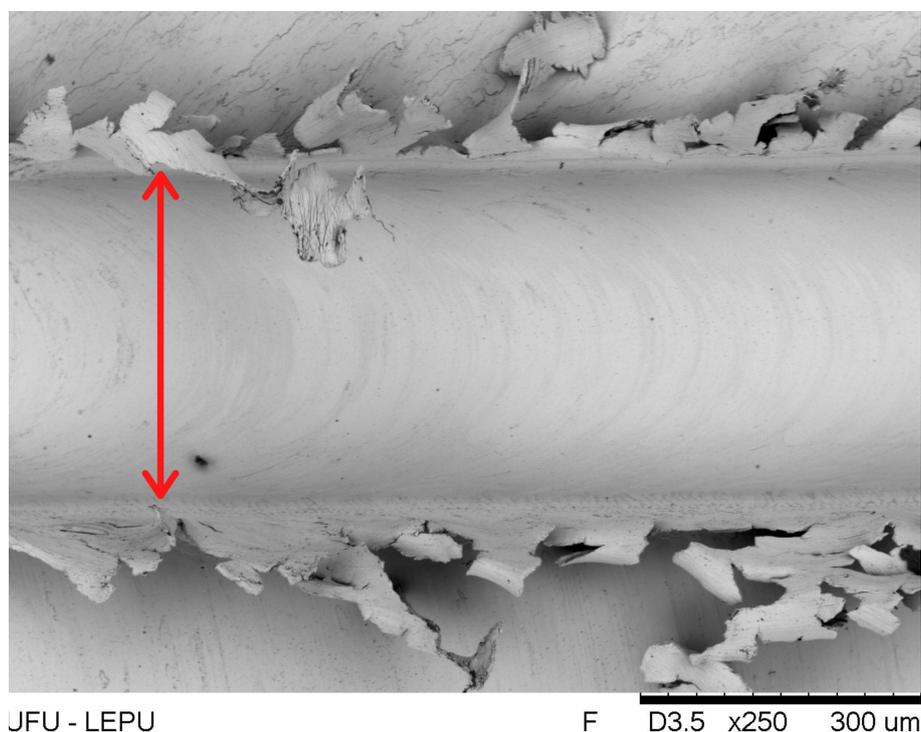


Figura 26 – Rebarbas em microcanal de Inconel 718 comprometendo a medição precisa da largura.

Sabendo que a rebarbação pode influenciar na qualidade final da peça, como objetivo complementar está a análise da qualidade superficial da mesma. A avaliação da

qualidade superficial de canais microfresados pode se dar através de dois métodos: usando imagens de microscopia do canal e/ou usando um perfilômetro. O uso de um perfilômetro tem a desvantagem de que a presença das rebarbas pode gerar grandes imprecisões, devido à grande espessura do apalpador em relação aos microcanais.

Portanto, o experimento será baseado na obtenção de microscopias das amostras antes e depois das operações de rebarbação, para que sejam obtidas as seguintes variáveis de saída:

- Rugosidade do fundo do canal;
- Altura das rebarbas;
- Profundidade do canal;
- Largura do canal (desgaste da microfresa).

Para obter as variáveis de saída, foi usado um microscópio confocal a laser Olympus Lext OLS4100 (figura 27), disponível no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Confocal Laser da Universidade de Brasília.

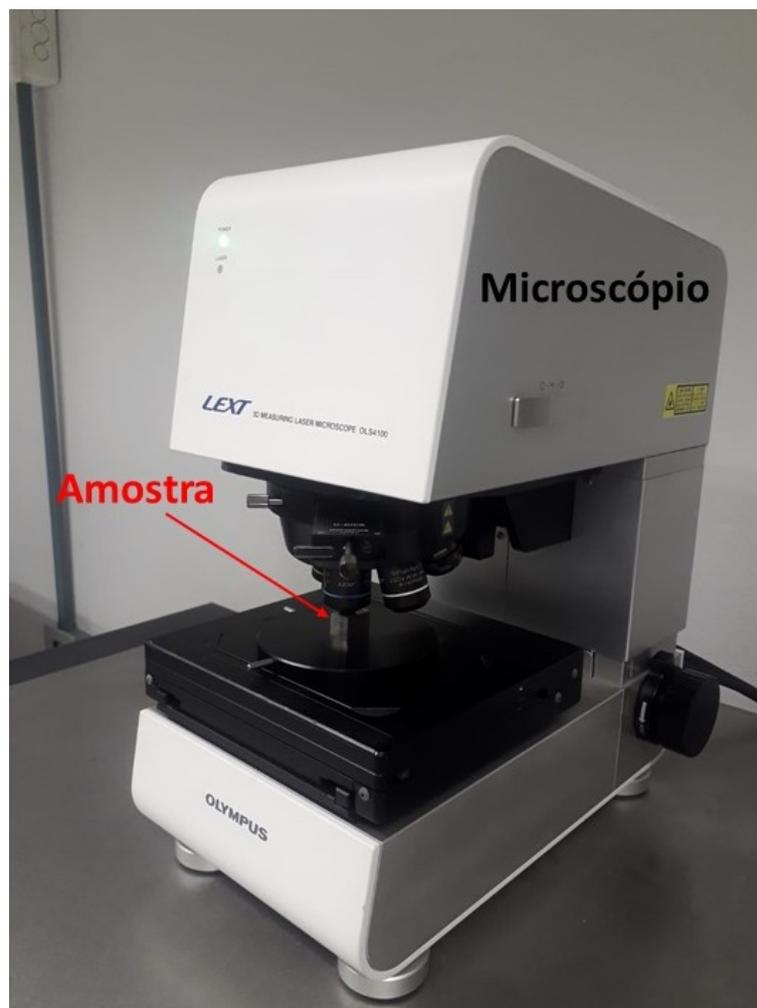


Figura 27 – Amostra posicionada no microscópio utilizado no experimento.

### 3.4.1 Rugosidade dos microcanais

Foram feitas três medições de rugosidade, em regiões distintas de cada microcanal, para que fosse possível obter as médias e desvios padrão. Os resultados serão apresentados com intervalo de confiança de 95,45%. Foi usada a lente do microscópio com aumento de 20×, visto que o enquadramento da imagem dos microcanais era mais adequado para essa lente. As medições foram feitas nas regiões centrais de cada microcanal, o mais distante possível das laterais. Foi adotado o parâmetro  $R_a$ , utilizando filtro de Gauss com cut-off  $\lambda_c = 800 \mu\text{m}$  e comprimento de amostragem  $n = 5$ , conforme a ABNT NBR ISO 4288. A figura 28 mostra o sentido de avanço da microfresa e o sentido de medição da rugosidade ao longo dos microcanais.

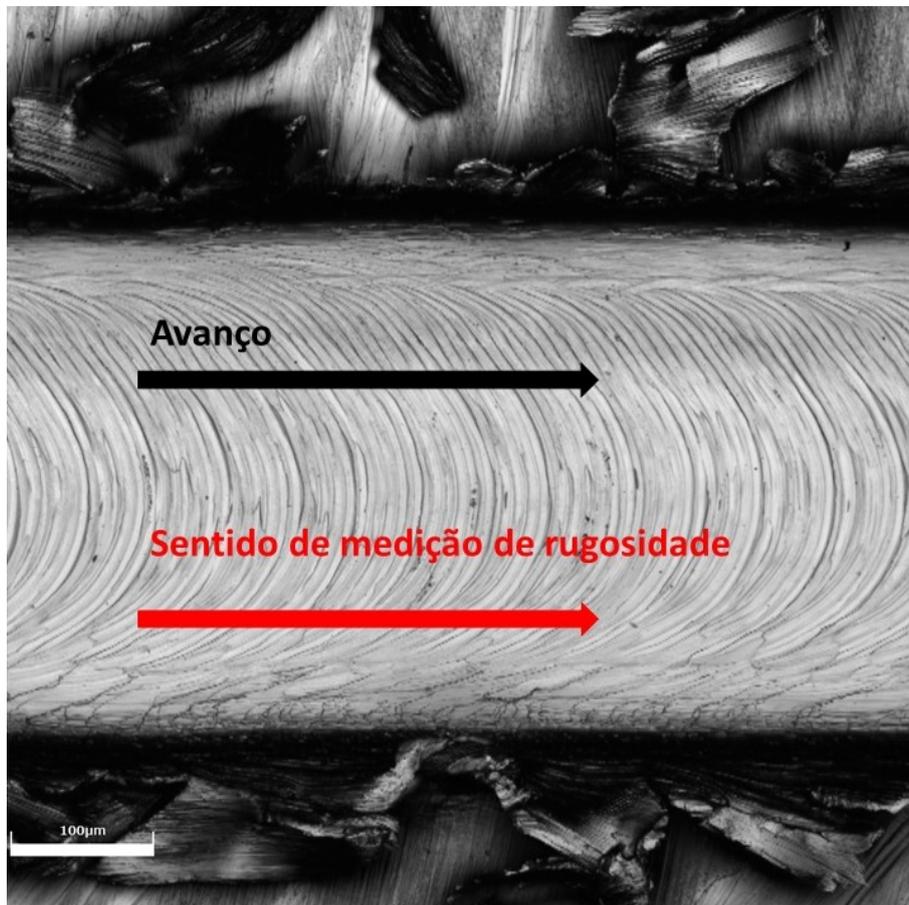


Figura 28 – Medição da rugosidade ao longo dos microcanais.

No Anexo A, está exemplificado o relatório gerado pelo equipamento com os valores de rugosidade medidos para o canal 12 do ensaio de 20000 rpm antes da rebarbação.

### 3.4.2 Topografia das amostras

Através do microscópio, foram obtidas imagens que mostram as variações de relevo através do perfil de cada microcanal. Em cada imagem, foi posicionada uma linha vertical de referência que coincide com a superfície da amostra. Com a linha de referência mantida

estática, uma linha de medição era posicionada nas extremidades das rebarbas, que podem ser concordantes ou discordantes dependendo da posição da lateral do microcanal em relação ao sentido de avanço da microfresa. A linha vertical de medição também pôde ser posicionada no fundo do microcanal, de modo que o software fornecesse as distâncias entre as linhas, que correspondiam aos valores de profundidade e de altura de rebarbas. Essa metodologia de medição está mostrada na figura 29. Todas as medições foram feitas três vezes, em diferentes partes do microcanal, para o cálculo das médias e desvios padrão.

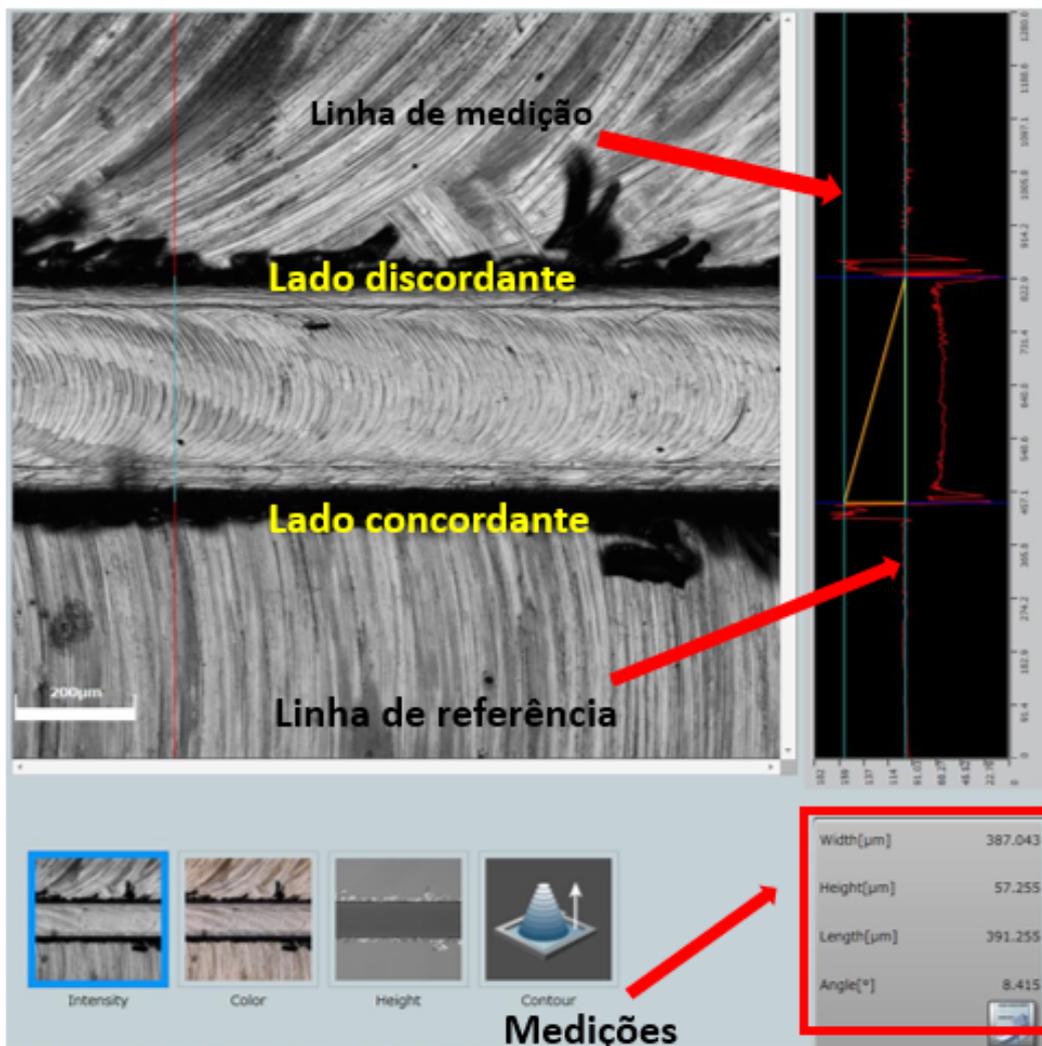


Figura 29 – Medição da altura de rebarbas e profundidade dos microcanais.

De maneira análoga, o posicionamento de linhas horizontais nas duas extremidades do microcanal também permitiu medir sua largura. Conforme pode ser observado através das setas vermelhas no modelo 3D da figura 30, a presença das rebarbas causou imprecisões na geração do perfil do microcanal. Isso dificultava o posicionamento preciso das linhas para medição da largura, embora não causasse diferenças muito significativas nos valores finais. Esses erros demonstraram tendência a diminuir quando as medições foram feitas nas peças já rebarbadas.

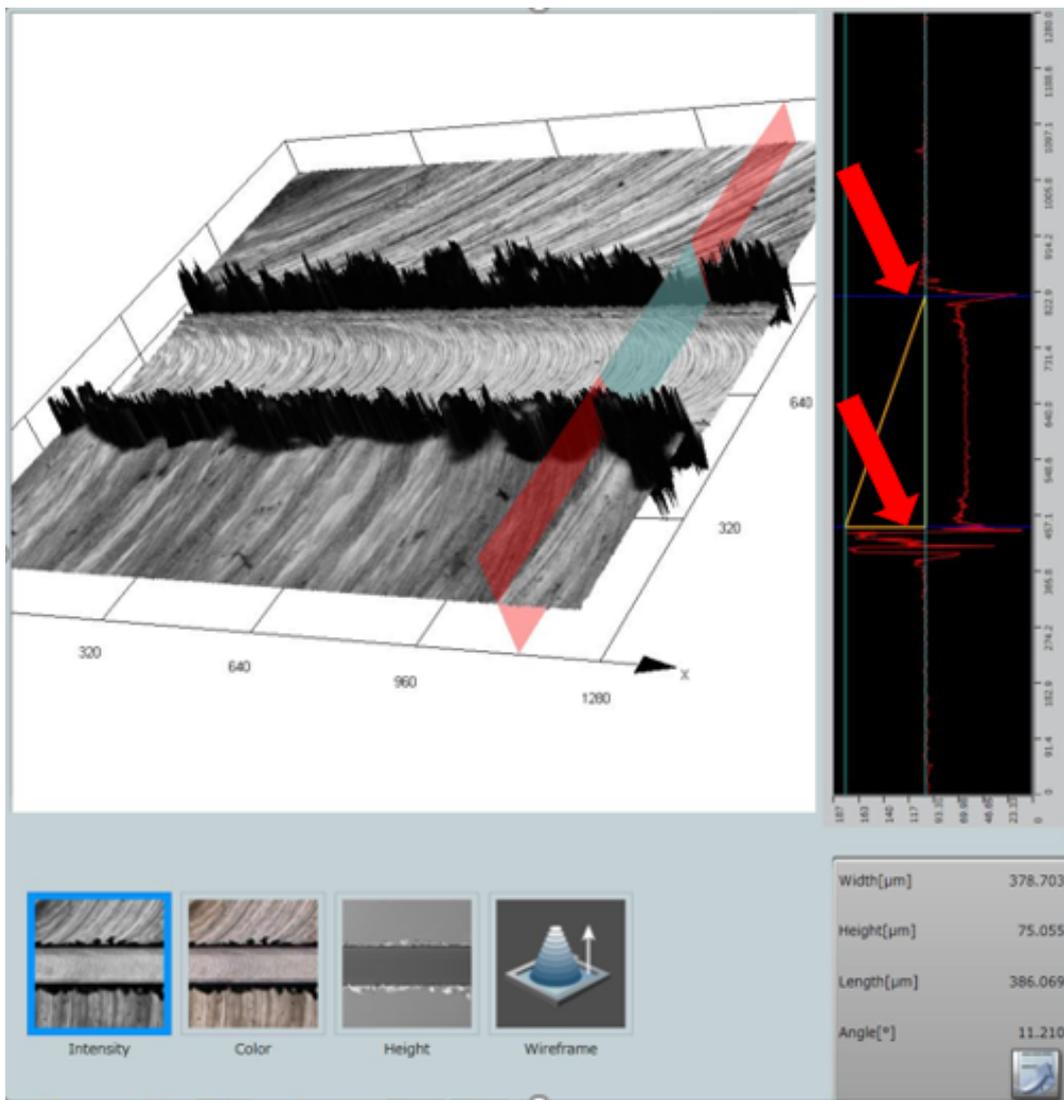


Figura 30 – Exemplificação das pequenas imprecisões na medição de largura devido às rebarbas nas paredes do microcanal.

## 4 Resultados e Discussões

Para todas as variáveis de saída, foi calculada a média e o desvio padrão em cada microcanal. Com o objetivo de facilitar a leitura e interpretação, os dados serão apresentados graficamente. Assim, neste capítulo, serão apresentados os gráficos das variáveis de saída em cada amostra, comparando seus valores antes e depois do experimento de rebarbação. Além disso, serão mostradas imagens representativas de microscopia de alguns microcanais selecionados, para que se possa analisar a qualidade de suas superfícies.

### 4.1 Rugosidade

Os gráficos com os valores médios da rugosidade  $R_a$  das amostras estão apresentados nas figuras 31 a 34.

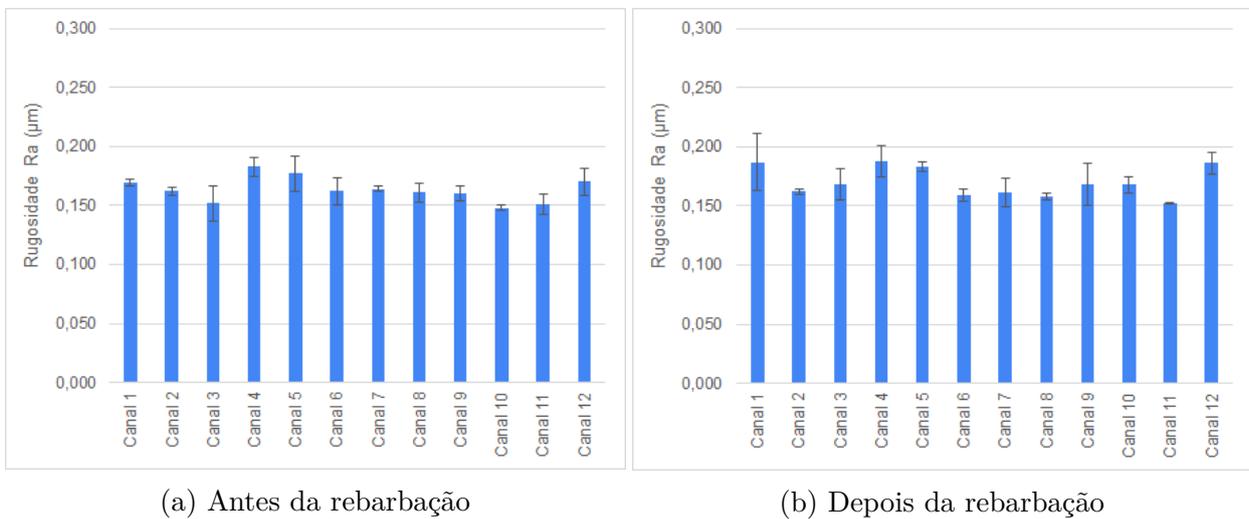
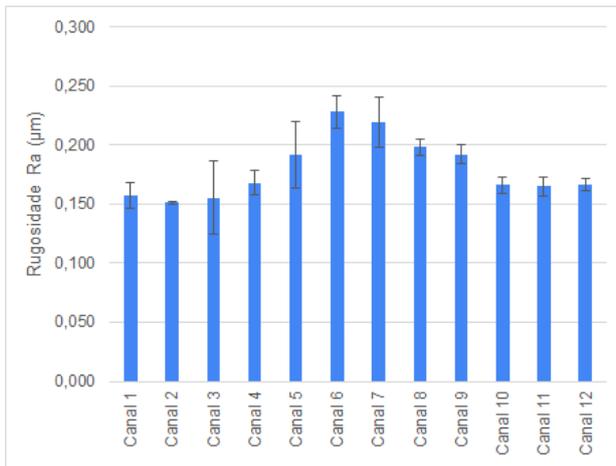
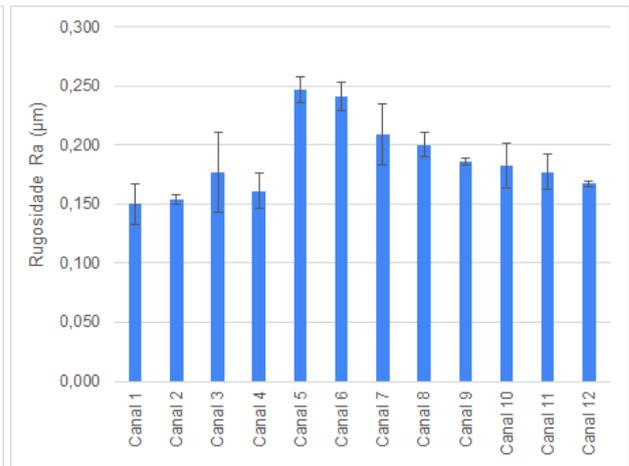


Figura 31 – Valores de rugosidade para o ensaio com  $n = 11000$  rpm.

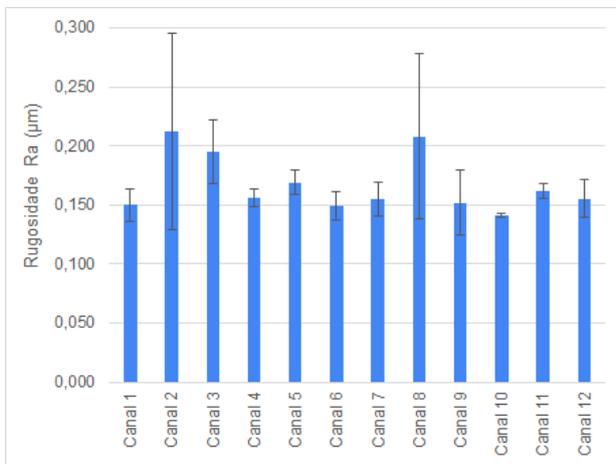


(a) Antes da rebarbação

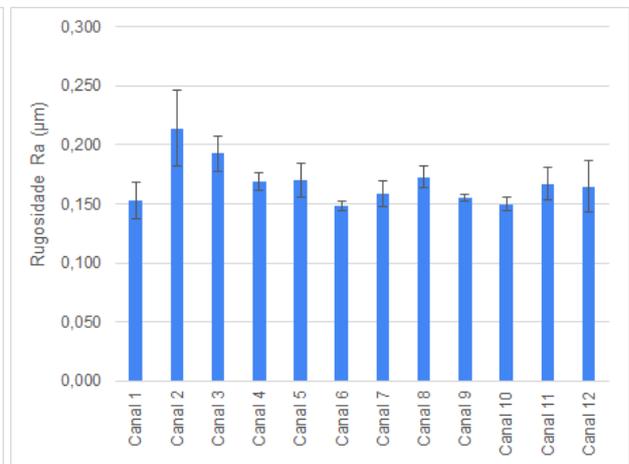


(b) Depois da rebarbação

Figura 32 – Valores de rugosidade para a réplica com  $n = 11000$  rpm.

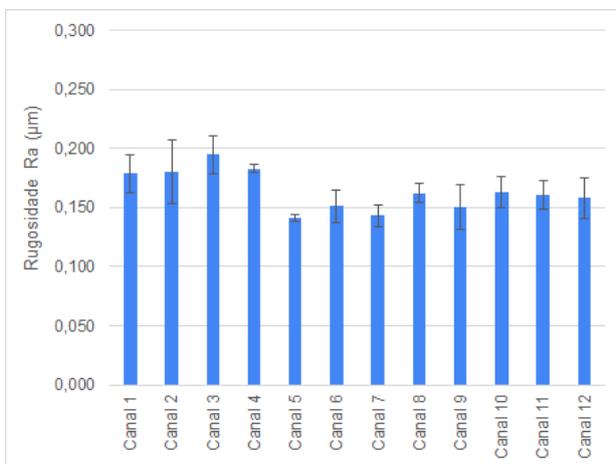


(a) Antes da rebarbação

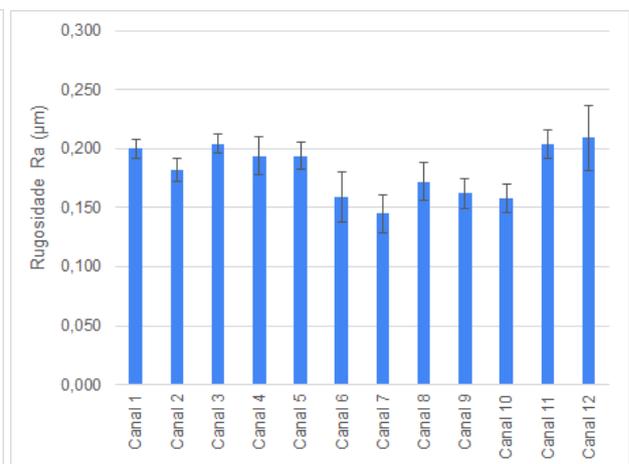


(b) Depois da rebarbação

Figura 33 – Valores de rugosidade para o ensaio com  $n = 20000$  rpm.



(a) Antes da rebarbação



(b) Depois da rebarbação

Figura 34 – Valores de rugosidade para a réplica com  $n = 20000$  rpm.

É possível notar que, ao comparar a rugosidade antes e depois da rebarbação, houve uma sutil tendência de aumento nos valores. Isso possivelmente se deve ao fato de que, durante o lixamento, tanto abrasivos soltos como partículas de material das rebarbas removidas podem ter entrado em contato com o fundo do canal, deixando marcas que interferiram nos valores de rugosidade. Para todas as condições, os desvios-padrão foram baixos. Diferentemente do comportamento geral, alguns microcanais apresentaram aumento considerável de rugosidade após o lixamento, como o canal 5 da figura 32 (aumento de 29%) e os canais 5, 11 e 12 da figura 34 (aumentos de 38%, 27% e 32%, respectivamente). Todos os outros canais apresentaram aumentos de rugosidade inferiores a 15%, ou até mesmo redução, para alguns canais. Os maiores valores de rugosidade foram obtidos na réplica microfresada com rotação de 11000 rpm, cuja rugosidade média para todos os 12 canais foi de  $0,188 \mu\text{m}$  após a rebarbação.

De maneira geral, os valores de rugosidade foram baixos se comparados com os obtidos por Aslantas e ÇIÇEK (2018). Os autores, que estudaram microfresamento de Inconel 718 com microfresas de  $600 \mu\text{m}$  revestidas de TiCN, obtiveram valores médios de  $R_a$  todos superiores a  $0,200 \mu\text{m}$ , tanto para microfresamento a seco quanto com sistema *MQL*. Para condição de lubrificação com fluido em abundância, usando tanto uma emulsão de água com óleo quanto etanol, os valores de rugosidade obtidos pelos autores foram ainda maiores, ultrapassando  $0,400 \mu\text{m}$ . Isso indica que a rugosidade tende a ser menor quando há aplicação de fluido de corte, especialmente no sistema *MQL*. Os autores atribuem esse resultado ao fato de que, no sistema *MQL*, o spray de óleo e ar na zona de corte a uma determinada pressão causa uma rápida remoção de cavaco, enquanto que no microfresamento a seco, os cavacos são facilmente aderidos à superfície recém-usinada.

Os valores médios de rugosidade aqui obtidos variam de  $0,163 \mu\text{m}$  a  $0,188 \mu\text{m}$  para cada amostra. No experimento realizado por Uçun, Aslantas e Bedir (2015), no qual os autores usaram microfresas de  $768 \mu\text{m}$  de diâmetro com e sem revestimento de *DLC*, com  $v_c = 48 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 5,00 \mu\text{m}$  e  $a_p = 150 \mu\text{m}$ , para um comprimento usinado de  $120 \text{ mm}$ , foi obtido  $R_a = 0,09 \mu\text{m}$  independentemente da presença de revestimento na microfresa. Já para o comprimento usinado de  $10 \text{ mm}$ , foi obtido  $R_a$  de  $0,15 \mu\text{m}$  para a ferramenta revestida e  $0,16 \mu\text{m}$  para a ferramenta não revestida de *DLC*. Esses valores são semelhantes ao que foi encontrado no presente trabalho, especialmente considerando-se que as microfresas aqui utilizadas também possuíam revestimento. Esses resultados indicam que a qualidade da superfície usinada com o revestimento é melhor do que com a ferramenta não revestida, o que pode ser atribuído à menor presença de aresta postiça de corte nas superfícies usinadas com a microfresa revestida.

## 4.2 Altura das rebarbas

As rebarbas foram divididas em concordantes e discordantes, de acordo com o lado do microcanal em que elas se encontravam, em relação à direção de avanço da microfresa. Os valores de altura de rebarba estão apresentados nos gráficos das figuras 35 a 38.

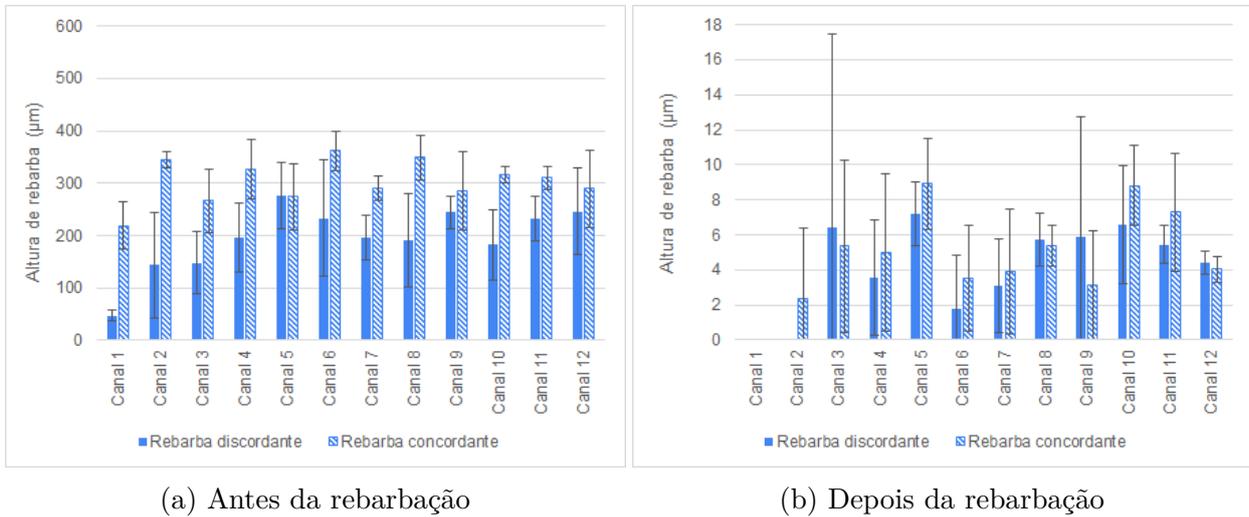


Figura 35 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio com  $n = 11000$  rpm.

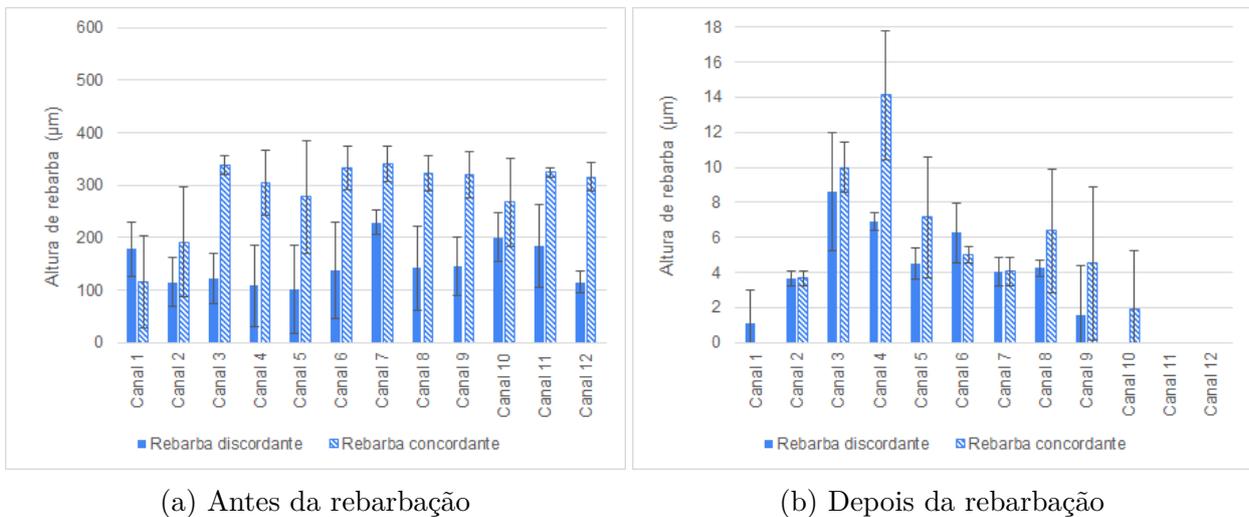
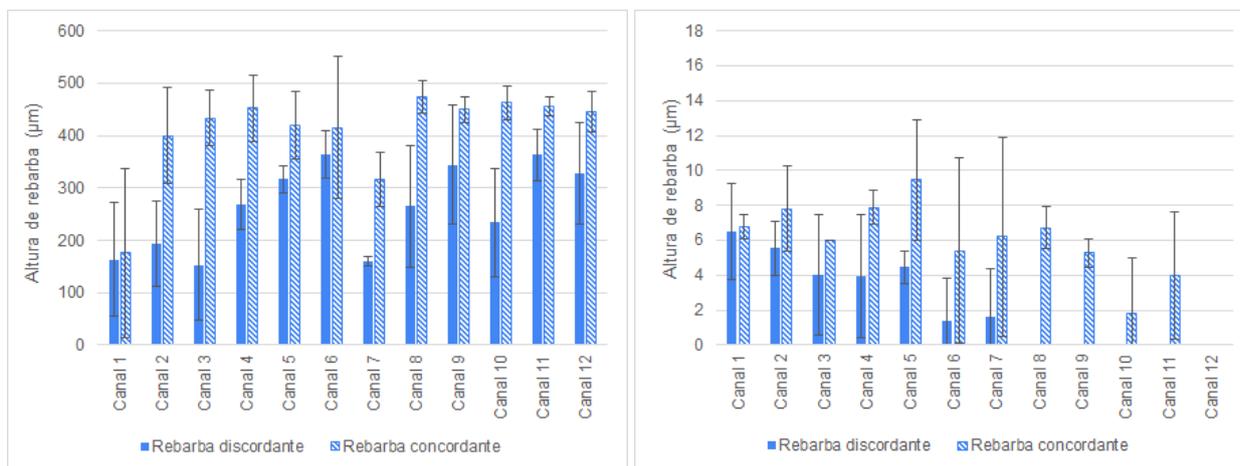


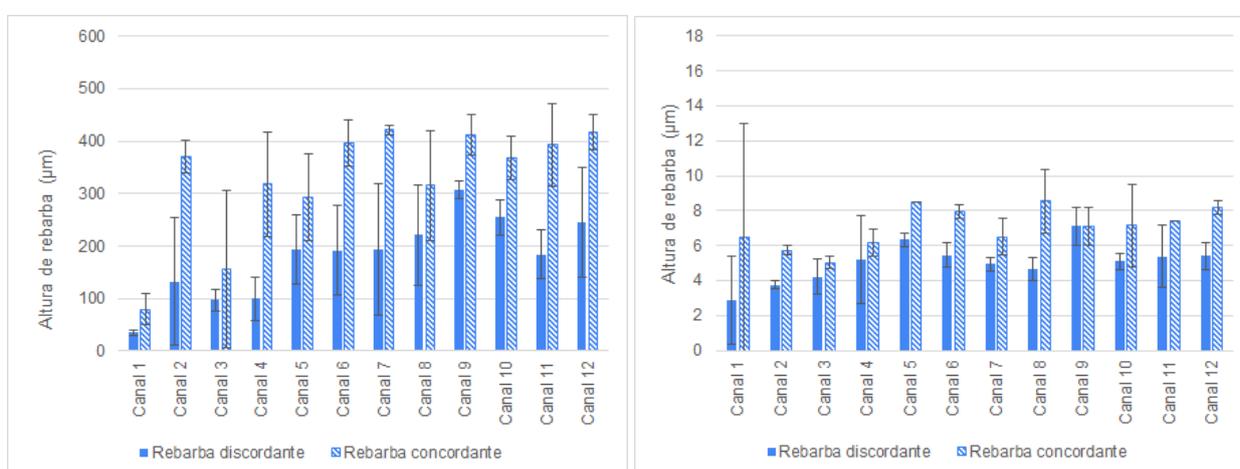
Figura 36 – Valores de altura de rebarbas para a réplica com  $n = 11000$  rpm.



(a) Antes da rebarbação

(b) Depois da rebarbação

Figura 37 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio com  $n = 20000$  rpm.



(a) Antes da rebarbação

(b) Depois da rebarbação

Figura 38 – Valores de altura de rebarbas para a réplica com  $n = 20000$  rpm.

Observa-se, em geral, que as alturas das rebarbas antes do lixamento apresentam valores elevados, algumas vezes até superiores à largura do microcanal ( $400 \mu\text{m}$ ). O canal 1 apresentou uma tendência a ter valores mais baixos de altura de rebarba, especialmente rebarba concordante, para todas as amostras. Isso pode indicar uma tendência de aumento da altura de rebarba com o aumento do desgaste da microfresa, embora esse aumento não tenha nenhum padrão aparente depois do canal 1. Nas amostras usinadas com  $n = 20000$  rpm, as rebarbas antes do lixamento eram maiores do que com  $n = 11000$  rpm.

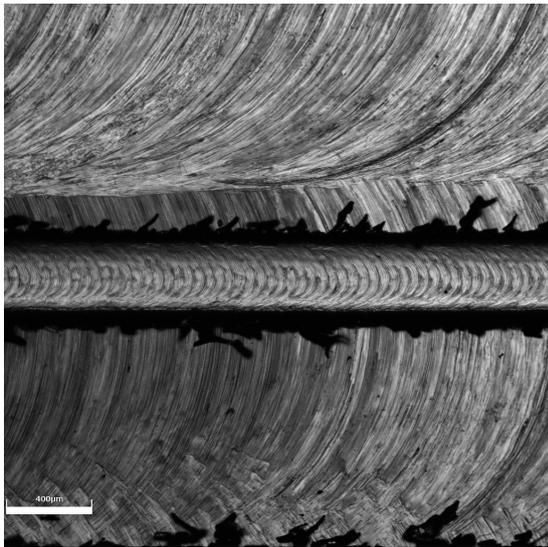
As rebarbas concordantes apresentaram uma evidente tendência a serem maiores que as discordantes, algumas vezes sendo até mais que 100% maiores. Resultados semelhantes foram obtidos no trabalho de Ziberov (2018), que estudou o microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V com microferramentas de metal duro com diâmetro  $152,4 \mu\text{m}$  com e sem revestimentos de *TiAlN* ou de *DLC*. O autor identificou que, na região onde a microferramenta atingiu o critério de fim de vida, a altura da rebarba no lado concor-

dante alcança até  $6,684 \mu\text{m}$ , enquanto o discordante alcança até  $16,977 \mu\text{m}$ , o que também representa uma diferença de mais de 100%.

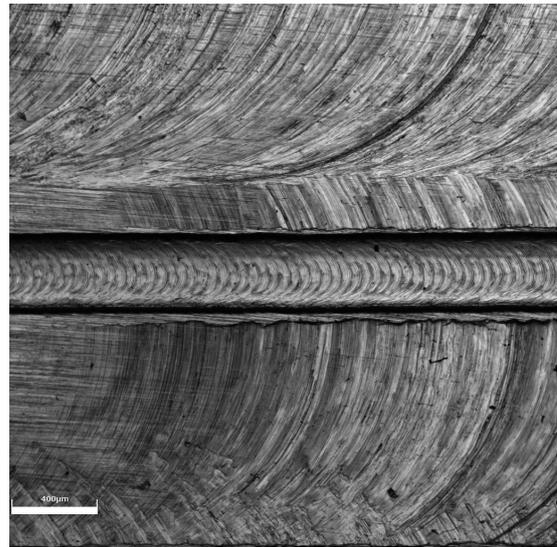
Santos (2016) realizou um estudo de microfresamento em aço inoxidável Duplex S32205, utilizando microferramentas de metal duro revestidas com nitreto de titânio com diâmetro de  $381 \mu\text{m}$ . A autora também observou tendência de que as rebarbas do lado concordante fossem maiores, porém esses dados apresentaram grande variabilidade de leituras, também com elevados valores de desvio padrão. Essa diferença de altura entre os lados concordante e discordante, segundo a autora, pode ser explicada pela quantidade de material que é empurrada em frente da aresta de corte e na direção da força de corte, como resultado da rotação da ferramenta. Foi possível notar que o desgaste da ferramenta no trabalho de Santos (2016) não exerceu influência sobre a altura de rebarba, visto que as rebarbas só aumentaram significativamente quando a microfresa quebrou.

Em um outro trabalho, Santos (2020) realizou o microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V usando microfresas com e sem revestimento. Nesse estudo, percebeu-se uma tendência da área das rebarbas de aumentar com o comprimento usinado. Segundo a autora, o desgaste da ferramenta influencia no seu desempenho quanto à formação de cavacos, pois o aumento do raio de aresta torna a aresta de corte menos afiada, ocasionando maior formação de rebarbas. No presente trabalho, entretanto, não foi observada uma tendência tão evidente em relação ao desgaste. Isso pode ser justificado pelo fato de que, no trabalho de Santos (2020), o comprimento usinado chegava a 1350 mm, enquanto aqui é de apenas 180 mm. É possível que para comprimentos usinados maiores, teria sido possível notar com mais clareza a relação entre desgaste e altura de rebarba.

Os valores de desvio-padrão aqui obtidos foram altos, devido à irregularidade das características das rebarbas em microfresamento. Ao observar os gráficos depois do lixamento, percebe-se uma maior regularidade nos valores, com alguns microcanais apresentando até valores nulos, ou seja, rebarbas completamente removidas. A medição das alturas depois da rebarbação foi dificultada devido à pequena escala de tamanho, o que é coerente tendo em vista a grande diferença de ordem de grandeza antes e depois do lixamento. Antes da rebarbação, as rebarbas concordantes tinham alturas em torno de  $300 \mu\text{m}$  a  $400 \mu\text{m}$ , mas a rebarbação fez com que esses valores diminuíssem para menos de  $15 \mu\text{m}$  em todos os canais. Isso representa uma diminuição média de aproximadamente 98%, para um tempo de lixamento de apenas 30 s. A diminuição do tamanho das rebarbas pode ser observado melhor na figura 39, que mostra o canal 12 da amostra feita com  $n = 11000 \text{ rpm}$ .



(a) Antes da rebarbação



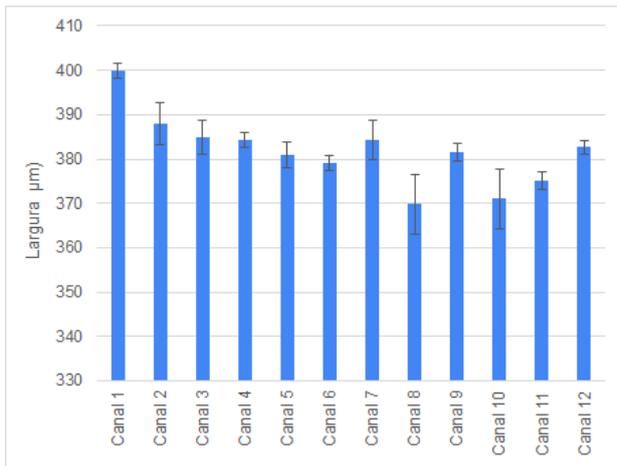
(b) Depois da rebarbação

Figura 39 – Contraste da presença de rebarbas em um microcanal representativo.

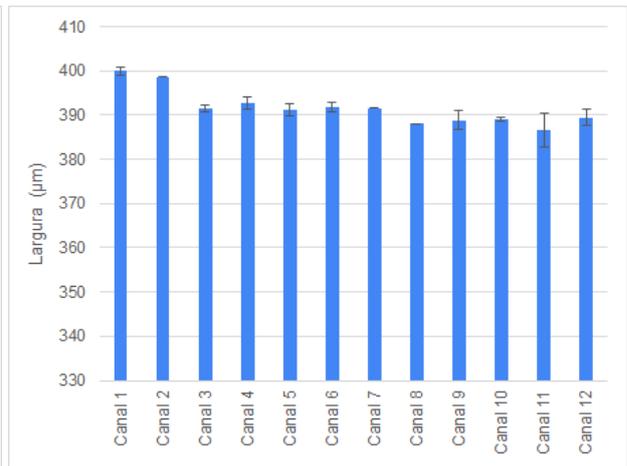
### 4.3 Largura dos microcanais

A medição da largura dos microcanais pode ser considerada uma forma indireta de medir o desgaste da microfresa. Esse método é mais simples e vantajoso porque, para medir o desgaste diretamente na microfresa, muitas vezes é necessário observá-la em um microscópio, como nos trabalhos de Ziberov (2018) e Santos (2020). O processo de obtenção de imagens de microscopia da microfresa pode ser desafiador devido ao difícil posicionamento da ferramenta no microscópio e devido à necessidade de se fazer um monitoramento constante, em diferentes fases do processo de corte.

Conforme pode ser observado nas figuras 40 a 43, é possível perceber que o fato das rebarbas terem sido removidas torna os valores de largura mais constantes em relação às medições antes da rebarbação. A presença das rebarbas gera essa imprecisão devido à dificuldade em se localizar o ponto exato onde se começa a parede do microcanal nas imagens de microscopia.

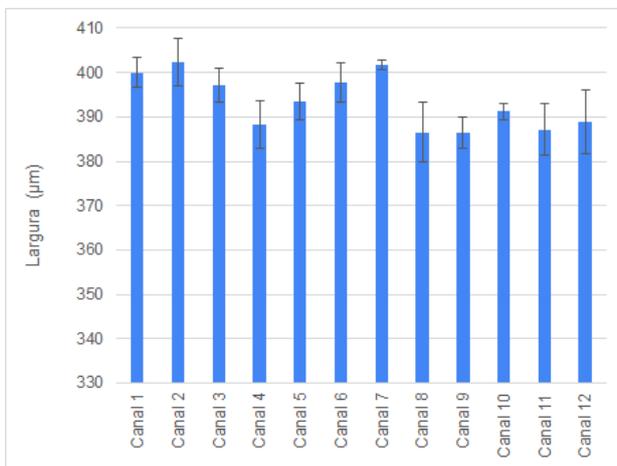


(a) Antes da rebarbação

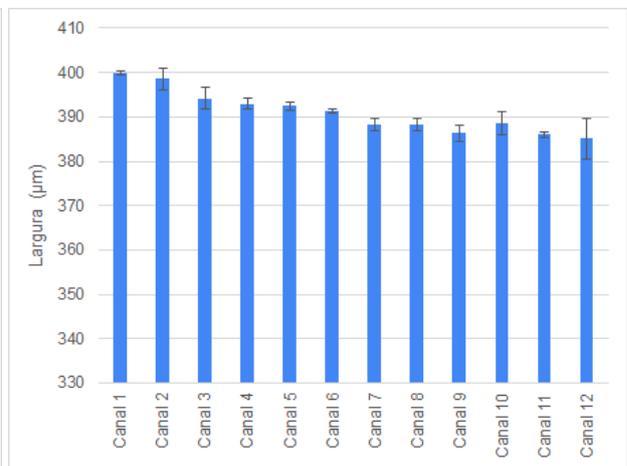


(b) Depois da rebarbação

Figura 40 – Valores de largura dos canais para o ensaio com  $n = 11000$  rpm.

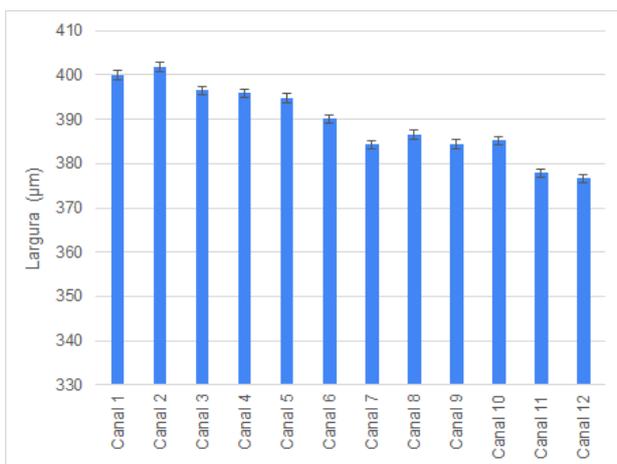


(a) Antes da rebarbação

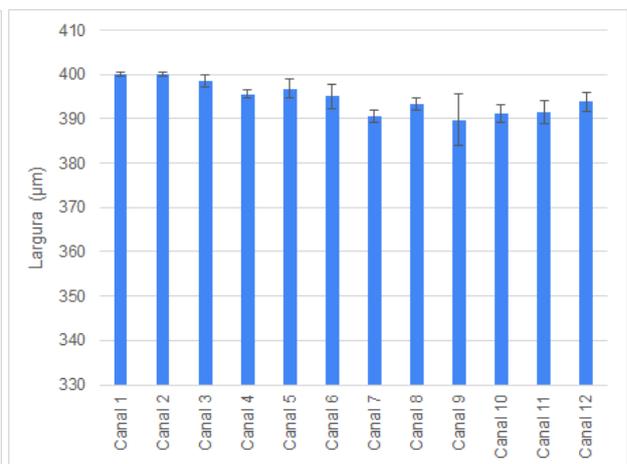


(b) Depois da rebarbação

Figura 41 – Valores de largura dos canais para a réplica com  $n = 11000$  rpm.



(a) Antes da rebarbação



(b) Depois da rebarbação

Figura 42 – Valores de largura dos canais para o ensaio com  $n = 20000$  rpm.

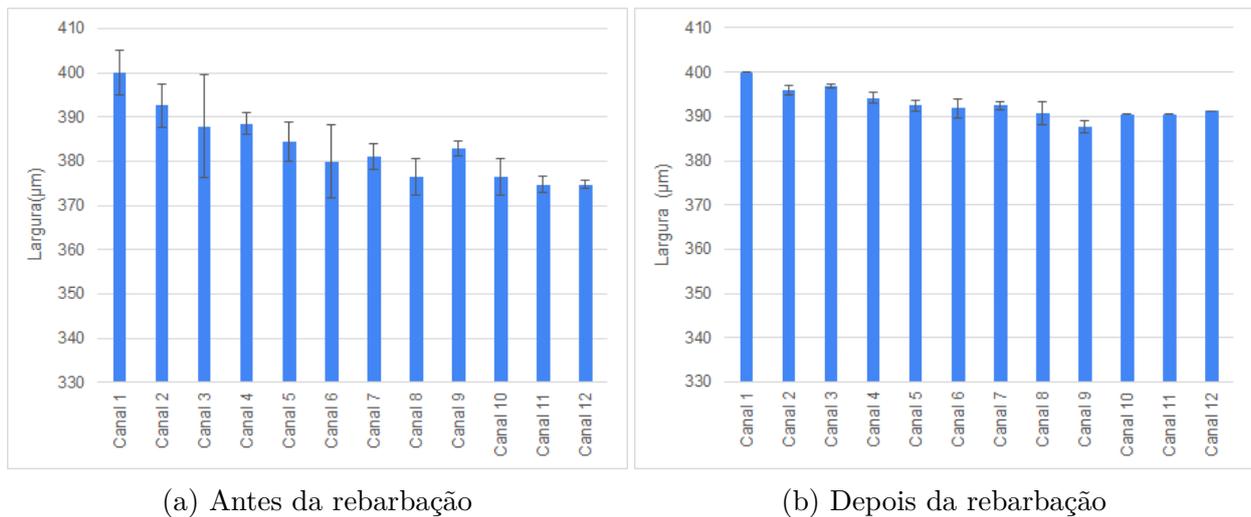


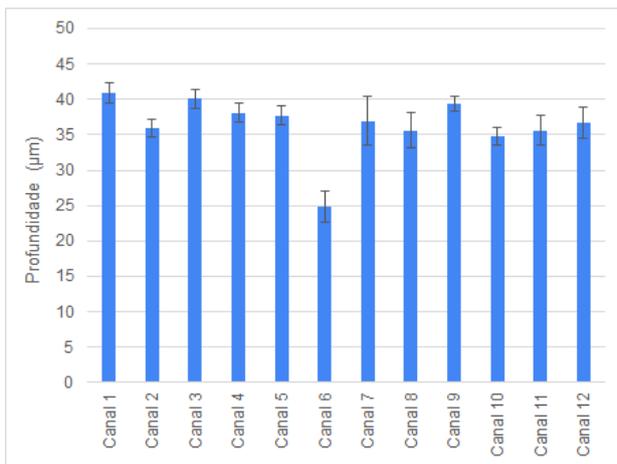
Figura 43 – Valores de largura dos canais para a réplica com  $n = 20000$  rpm.

Conforme observado nos gráficos, a imprecisão causada pela presença de rebarbas é evidenciada pelos maiores valores de desvio padrão e pela maior irregularidade nos valores para as medições antes do lixamento. Nos valores obtidos após o lixamento, percebe-se com mais clareza uma leve tendência de diminuição da largura com o aumento do comprimento usinado, pois a largura do canal 12 apresentou uma diminuição de cerca de  $10 \mu\text{m}$  em relação ao canal 1, na média para as quatro amostras. Esta redução era esperada uma vez que há o desgaste da ferramenta, consequentemente seu diâmetro é reduzido, o que interfere na largura dos canais. Além disso, pode-se notar que, para a situação após a rebarbação, há uma tendência de maiores valores de largura de canal nos últimos canais, ao se comparar com as medições de largura na presença de rebarbas. Este resultado pode indicar que as rebarbas dificultaram a medição do desgaste, tornando-a menos precisa.

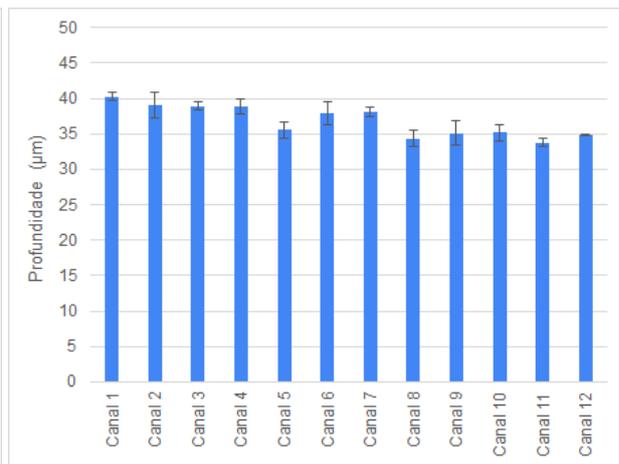
Essa diminuição da largura não foi tão intensa quando comparada aos valores obtidos por Santos (2020). A autora observou redução no diâmetro da microferramenta de 8,4% ao microfresar a liga Ti-6Al-4V, enquanto que, no presente trabalho, a diminuição foi inferior a 3,0%. Entretanto, o comprimento usinado no trabalho de Santos (2020) foi de 1288 mm, o que é muito superior aos 180 mm de comprimento usinado no presente trabalho. De qualquer forma, a diminuição da largura do microcanal é gerada pelo arredondamento da aresta de corte da microfresa, que se torna mais intenso de acordo com o aumento do comprimento usinado.

#### 4.4 Profundidade dos microcanais

Os valores obtidos para a profundidade dos microcanais estão apresentados nas figuras 44 a 47.

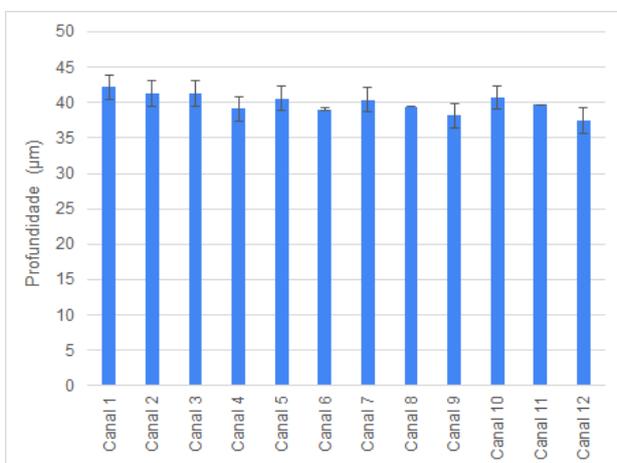


(a) Antes da rebarbação

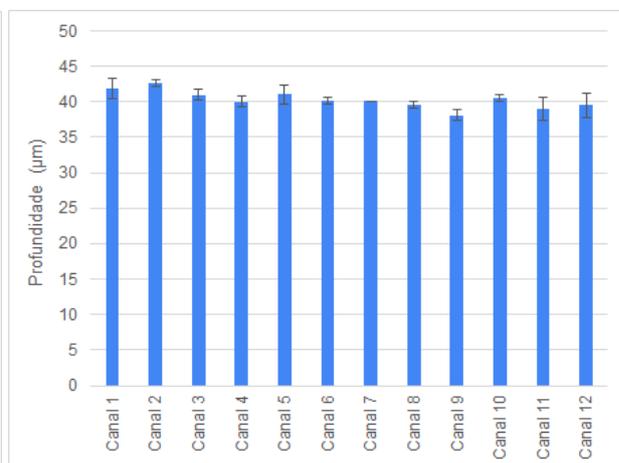


(b) Depois da rebarbação

Figura 44 – Valores de profundidade dos canais para o ensaio com  $n = 11000$  rpm.

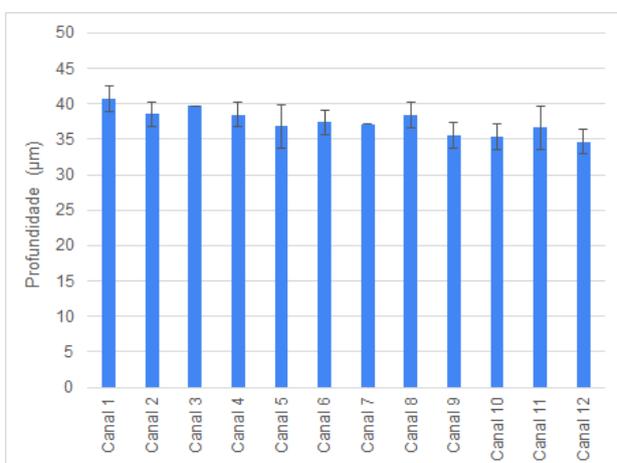


(a) Antes da rebarbação

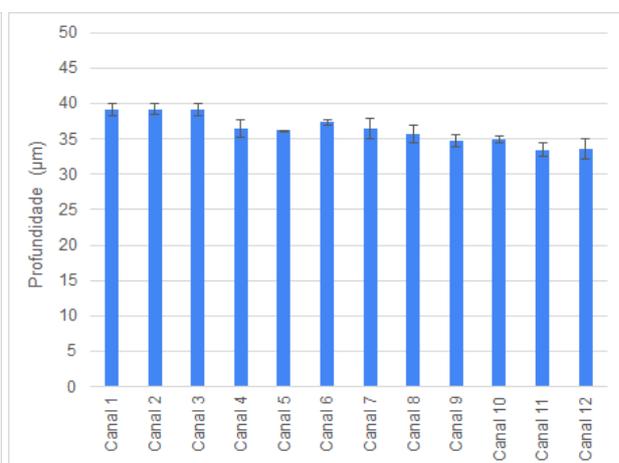


(b) Depois da rebarbação

Figura 45 – Valores de profundidade dos canais para a réplica com  $n = 11000$  rpm.



(a) Antes da rebarbação



(b) Depois da rebarbação

Figura 46 – Valores de profundidade dos canais para o ensaio com  $n = 20000$  rpm.

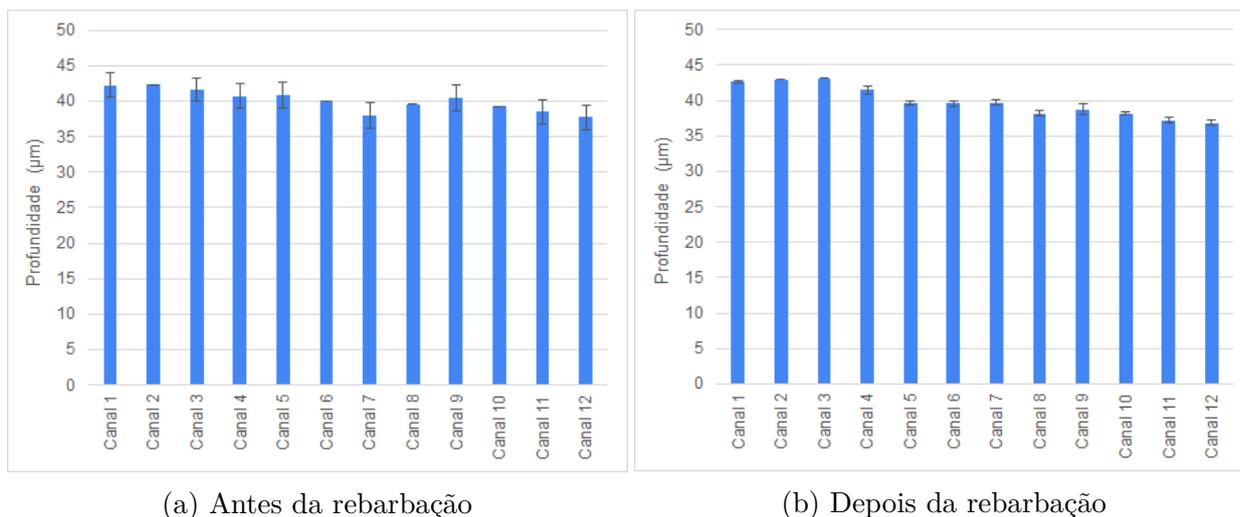


Figura 47 – Valores de profundidade dos canais para a réplica com  $n = 20000$  rpm.

Através das figuras, é possível perceber que a profundidade dos microcanais foi o parâmetro que demonstrou a maior regularidade antes e depois da rebarbação. A única exceção foi o canal 6 da figura 44a, com profundidade média de  $25 \mu\text{m}$ , enquanto todos os outros apresentaram valores entre  $33 \mu\text{m}$  e  $43 \mu\text{m}$ . É provável que esse valor discrepante tenha sido um erro de medição, especialmente considerando que quando o canal em questão foi medido novamente, após a rebarbação, foi obtido  $38 \mu\text{m}$  para a profundidade.

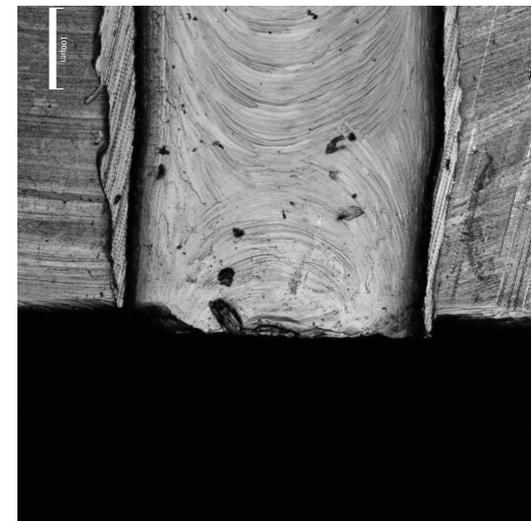
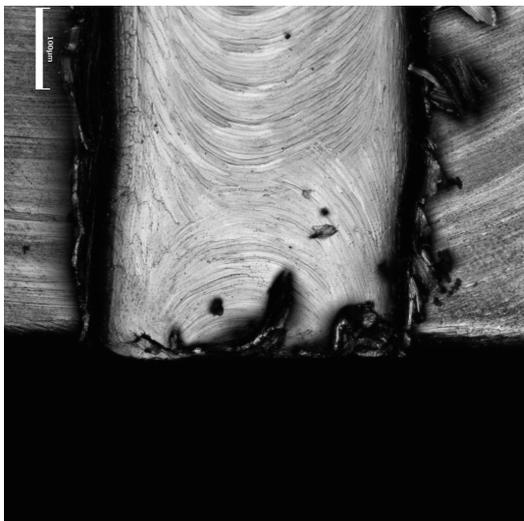
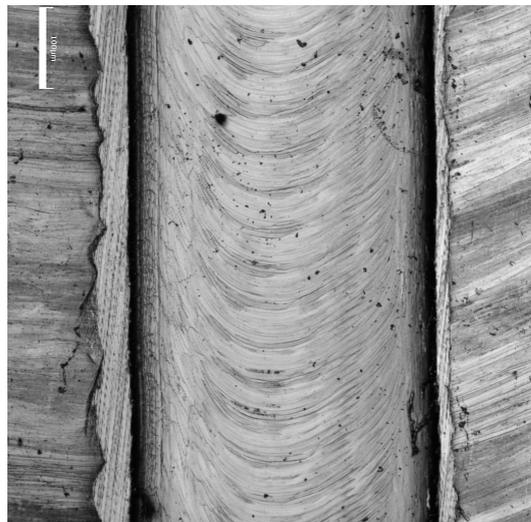
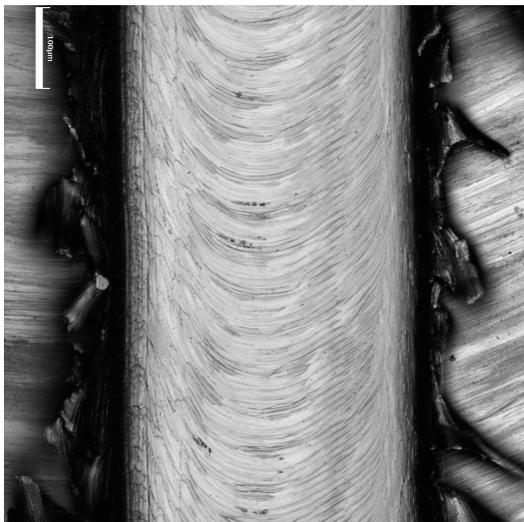
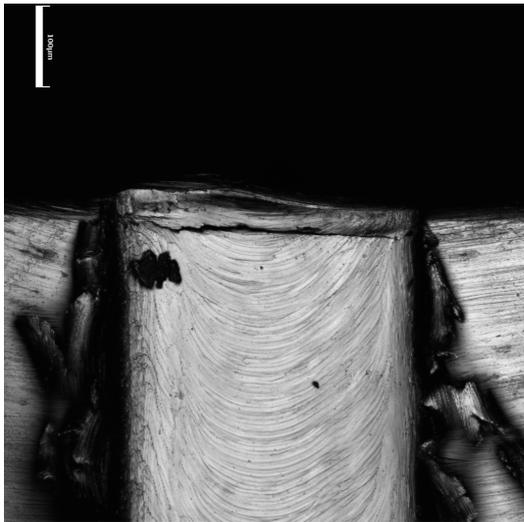
O erro de medição foi possivelmente causado pela definição inadequada dos parâmetros do feixe de laser do microscópio, no momento de obter a topografia desse canal. A obtenção de uma topografia incorreta, associada a erros no posicionamento da linha de medição como a mostrada na figura 29, pode ter levado à obtenção dessa altura menor do que o esperado. Esse tipo de erro não é surpreendente, tendo em vista a pequena escala de tamanho dos valores medidos e o fato de que as definições dos parâmetros de medição foram feitas manualmente, estando, portanto, sujeitas a erros do operador. Além disso, deve-se ressaltar que por ser um equipamento ótico, a presença de rebarbas com grandes dimensões e geometria variável pode ter interferido na leitura do equipamento. Este fato reforça que a aplicação de métodos de rebarbação é benéfica, tanto para a aplicação da peça, quanto para o controle na sua produção.

De maneira geral, os valores de desvio-padrão foram baixos, principalmente após o lixamento. Além disso, não se observou nenhuma tendência de diminuição da profundidade dos microcanais após o lixamento, o que indica que não houve danificação da superfície microssinada por parte do abrasivo. Mathai e Melkote (2012) também realizaram a rebarbação abrasiva em canais microfresados e também observaram pouca diferença entre as profundidades dos canais antes e depois da rebarbação.

## 4.5 Qualidade superficial dos microcanais

Nas figuras 48 e 49, são mostradas imagens de microscopia de diferentes regiões do canal 12 de duas amostras distintas: o ensaio com  $n = 11000$  rpm e com  $n = 20000$  rpm. Esses canais foram escolhidos para fins representativos pois foram feitos com a microfresa no estado mais desgastado, no final do comprimento usinado, representando as duas velocidades de rotação utilizadas no experimento. Nas imagens, é possível observar com detalhe a qualidade superficial dos canais antes e depois das amostras terem sido lixadas. Vale ressaltar, porém, que as imagens obtidas pelo microscópio revelaram características gerais muito semelhantes para todos os microcanais.

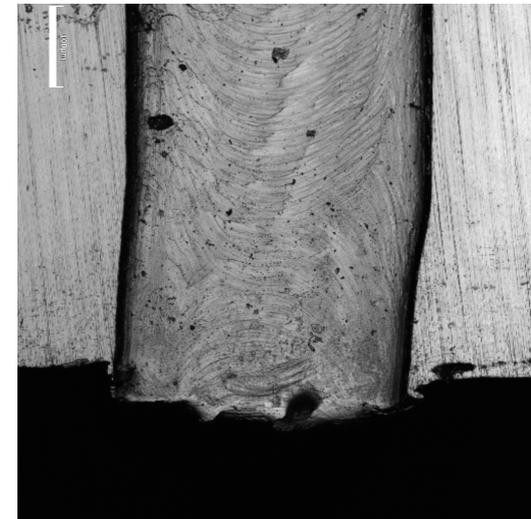
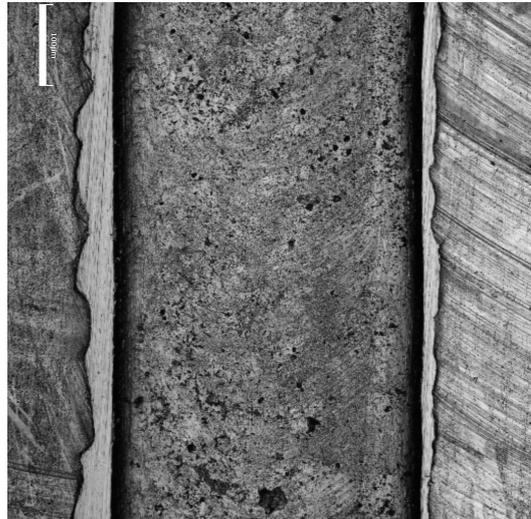
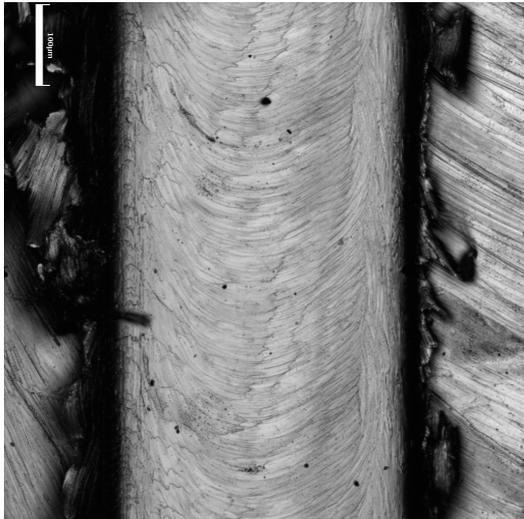
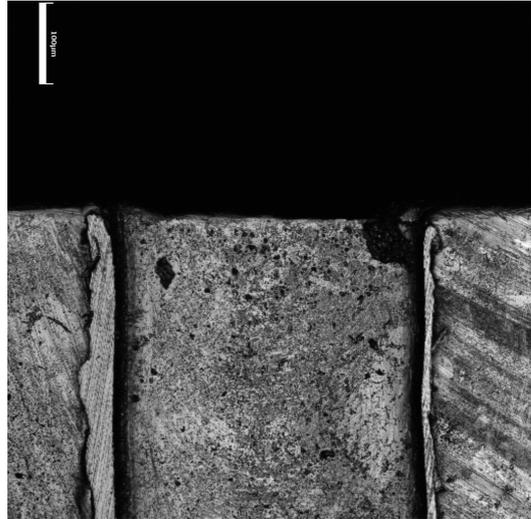
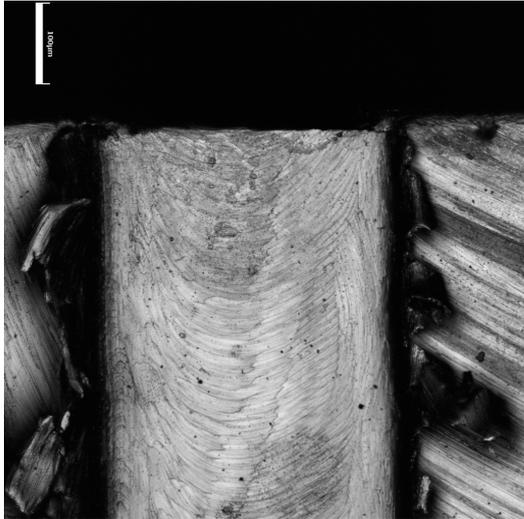
Conforme pode ser observado nas figuras 48 e 49, as marcas no fundo dos microcanais permaneceram praticamente inalteradas depois da operação de lixamento. É possível ver que, na posição de saída da microfresa, em ambas as amostras, houve uma pequena inclinação das paredes dos microcanais, caracterizando um leve desvio de trajetória da ferramenta. É provável que isso tenha acontecido porque, na posição de saída do microcanal, existe uma menor força na direção contrária ao avanço da ferramenta para fazer a sustentação da mesma, deixando-a mais propícia a erros de alinhamento. Além disso, embora algumas imagens tenham ficado com aspecto de pior qualidade após a rebarbação, o fato dos valores de rugosidade terem permanecido semelhantes não indica que tenha ocorrido uma deterioração significativa da superfície por parte do abrasivo.



(a) Antes da rebarbação

(b) Depois da rebarbação

Figura 48 – Canal 12 do ensaio com  $n = 11000$  rpm.



(a) Antes da rebarbação

(b) Depois da rebarbação

Figura 49 – Canal 12 da réplica com  $n = 20000$  rpm.

## 5 Conclusões

Através da revisão bibliográfica e dos procedimentos experimentais de rebarbação de microcanais de Inconel 718 obtidos por microfresamento, foi possível chegar às seguintes conclusões:

i. No que se refere à rugosidade:

- Os valores de rugosidade  $R_a$  dos microcanais antes e após a rebarbação se mantiveram relativamente baixos, entre  $0,150 \mu\text{m}$  e  $0,200 \mu\text{m}$ .
- A rebarbação das amostras levou a um sutil aumento nos valores de rugosidade, de cerca de 10%, devido ao contato de partículas com o fundo dos microcanais durante o lixamento.

ii. A respeito da altura das rebarbas:

- Antes do lixamento, os valores de altura das rebarbas eram altos, em torno de  $300 \mu\text{m}$ , e próximos da própria espessura dos microcanais, o que é comum em microfresamento devido ao intenso sulcamento causado pelo efeito escala.
- Os microcanais apresentavam rebarbas concordantes até 100% maiores do que as discordantes, o que é esperado devido à direção de rotação da microferramenta durante o processo de corte.
- As alturas das rebarbas não apresentaram um padrão baseado no desgaste da microfresa, tendo valores irregulares e com altos desvios-padrão ao longo de todo o comprimento usinado.

iii. Quanto à largura dos microcanais:

- A presença das rebarbas provocou imprecisões nas medições de largura antes da rebarbação, com maiores valores de desvio-padrão do que nas amostras rebarbadas.
- O fato do comprimento usinado em cada amostra ser pequeno ( $180 \text{ mm}$ ) levou a uma diminuição na largura inferior a 3%.

iv. No que se refere à profundidade dos microcanais:

- O lixamento não provocou nenhuma diminuição significativa nos valores de profundidade em relação às amostras não rebarbadas.
- v. No que tange a qualidade superficial dos microcanais:
- Após a rebarbação, a altura das rebarbas diminuiu em cerca de 98%, sem deteriorar de maneira significativa a superfície dos microcanais.
  - O método abrasivo se destaca pela sua simplicidade, versatilidade, facilidade de treinamento do operador e baixo custo, tendo se mostrado eficiente em remover as rebarbas das amostras em um baixo tempo de lixamento (30 s).

## 5.1 Sugestões de trabalhos futuros

A fim de aprofundar os estudos e complementar os resultados aqui obtidos, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- i. Realizar experimentos de rebarbação em superfícies microssinadas feitas de outros materiais;
- ii. Realizar a rebarbação em intervalos de tempos gradativos, para medir a taxa de redução das rebarbas;
- iii. Usar outros métodos de rebarbação, como por exemplo o polimento em vez de lixamento.

# Referências

ABNT. *NBR ISO 4288*: Especificações geométricas do produto (gps) - rugosidade: Método do perfil - regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. 10 p. Citado na página 36.

ALHADEFF, L.; MARSHALL, M.; CURTIS, D.; SLATTER, T. Protocol for tool wear measurement in micro-milling. *Wear*, v. 420-421, p. 54–67, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164818310433>>. Citado na página 34.

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, v. 33, n. 4, p. 402–407, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635908001529>>. Citado 3 vezes nas páginas v, 10 e 11.

ASLANTAS, K.; ÇIÇEK, A. The effects of cooling/lubrication techniques on cutting performance in micro-milling of inconel 718 superalloy. *Procedia CIRP*, v. 77, p. 70–73, 2018. 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118310680>>. Citado 4 vezes nas páginas v, 17, 18 e 41.

BEER, N.; ÖZKAYA, E.; BIERMANN, D. Drilling of inconel 718 with geometry-modified twist drills. *Procedia CIRP*, v. 24, p. 49–55, 2014. New Production Technologies in Aerospace Industry - 5th Machining Innovations Conference (MIC 2014). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711400937>>. Citado na página 7.

BOUZID, A. *Stratégie de sélection des meilleures méthodes d'ébavurage*. 149 p. Dissertação (Mestrado) — École de Technologie Supérieure - Université du Québec, Montréal, Canadá, 2017. Citado 5 vezes nas páginas vi, 20, 22, 23 e 24.

BUSHLYA, V.; ZHOU, J.; STAHL, J. Effect of cutting conditions on machinability of superalloy inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated pcbn tools. *Procedia CIRP*, v. 3, p. 370–375, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112002363>>. Citado na página 7.

CHAE, J.; PARK, S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 3, p. 313–332, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505001306>>. Citado 6 vezes nas páginas v, 1, 2, 9, 10 e 11.

CÂMARA, M.; RUBIO, J. C.; ABRÃO, A.; DAVIM, J. State of the art on micromilling of materials, a review. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 28, n. 8, p. 673–685, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030212601157>>. Citado 3 vezes nas páginas 2, 9 e 15.

CÂMARA, M. A. *Influência do Efeito Escala sobre a Operação de Microfresamento*. 191 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 11.

DIB, M.; DUDUCH, J.; JASINEVICIUS, R. Minimum chip thickness determination by means of cutting force signal in micro endmilling. *Precision Engineering*, v. 51, p. 244–262, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635917302039>>. Citado na página 11.

FANG, B.; YUAN, Z.; LI, D.; GAO, L. Effect of ultrasonic vibration on finished quality in ultrasonic vibration assisted micromilling of inconel718. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936120304532>>. Citado 4 vezes nas páginas v, 4, 16 e 17.

FEI; CHENG, X.; LIU, Y.; YANG, X.; MENG, F. Micromilling simulation for the hard-to-cut material. *Procedia Engineering*, v. 174, p. 693–699, 2017. 13th Global Congress on Manufacturing and Management Zhengzhou, China 28-30 November, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817302096>>. Citado na página 16.

GILLESPIE, L. K. *The Formation and Properties of Machining Burrs*. 166 p. Dissertação (Mestrado) — Utah State University, Logan, Utah, EUA, 1973. Citado na página 12.

GILLESPIE, L. K. *Deburring and edge finishing handbook*. New York: Society of Manufacturing Engineers, 1999. Citado 5 vezes nas páginas vi, viii, 20, 23 e 24.

GILLESPIE, L. K. *Hand Deburring: Increasing Shop Productivity*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2003. Citado 6 vezes nas páginas v, 4, 21, 22, 25 e 32.

JAIN, V. K. (Ed.). *Micromanufacturing processes*. Boca Raton, Florida, EUA: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 9.

JEYAPANDIARAJAN, P.; ANTHONY, X. M. Evaluating the machinability of inconel 718 under different machining conditions. *Procedia Manufacturing*, v. 30, p. 253–260, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919300678>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 6.

KHAN, K.; VARGHESE, A.; DIXIT, P.; JOSHI, S. S. Effect of tool path complexity on top burrs in micromilling. *Procedia Manufacturing*, v. 34, p. 432–439, 2019. 47th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 47, Pennsylvania, USA. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919309175>>. Citado na página 25.

KIENZLER, A.; DEUCHERT, M.; SCHULZE, V. *Burr Minimization and Removal by Micro Milling Strategies or Micro Peening Processes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. 237–243 p. Citado 4 vezes nas páginas vi, 25, 26 e 32.

KOU, Z.; WAN, Y.; CAI, Y.; LIANG, X.; LIU, Z. Burr controlling in micro milling with supporting material method. *Procedia Manufacturing*, v. 1, p. 501–511, 2015. 43rd North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 43, 8-12 June 2015, UNC Charlotte, North Carolina, United States. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235197891501015X>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

LEE, S.; DORNFELD, D. Precision laser deburring. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 123, 11 2001. Citado 4 vezes nas páginas viii, 26, 27 e 32.

LIAO, Y.; LIN, H.; WANG, J. Behaviors of end milling inconel 718 superalloy by cemented carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 201, n. 1, p. 460–465, 2008. 10th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607012009>>. Citado 3 vezes nas páginas v, 7 e 8.

LIU, Y.; XU, D.; AGMELL, M.; SAOUBI, R. M.; AHADI, A.; STAHL, J.-E.; ZHOU, J. Numerical and experimental investigation of tool geometry effect on residual stresses in orthogonal machining of inconel 718. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 106, p. 102187, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X2030126X>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 6.

MATHAI, G.; MELKOTE, S. Effect of process parameters on the rate of abrasive assisted brush deburring of microgrooves. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 57, p. 46–54, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695512000399>>. Citado 6 vezes nas páginas vi, 27, 28, 29, 32 e 49.

MATHAI, G.; MELKOTE, S.; ROSEN, D. Material removal during abrasive impregnated brush deburring of micromilled grooves in niti foils. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 72, p. 37–49, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695513000898>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 32.

MIAN, A.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. Identification of factors that dominate size effect in micro-machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 51, n. 5, p. 383–394, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695511000174>>. Citado na página 11.

MITSUBISHI. *Metric End Mill Series*. 2021. Disponível em: <<https://www.mitsubishicarbide.com/mmus/catalog/pdf/lj/lj403a.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2021. Citado 2 vezes nas páginas vi e 31.

MUSFIRAH, A.; GHANI, J.; HARON, C. C. Tool wear and surface integrity of inconel 718 in dry and cryogenic coolant at high cutting speed. *Wear*, v. 376-377, p. 125–133, 2017. 21st International Conference on Wear of Materials. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164817301060>>. Citado na página 8.

NG, C. K.; MELKOTE, S. N.; RAHMAN, M.; Senthil Kumar, A. Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-t6. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 9, p. 929–936, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505002130>>. Citado na página 2.

OLIVEIRA, D. D. *Efeito Escala e Integridade Superficial no Microfresamento da Liga de Níquel Inconel 718*. 154 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2019. Citado 10 vezes nas páginas v, vi, viii, 4, 9, 10, 12, 19, 30 e 32.

OLIVEIRA, L. C. P. *Estudo da formação de rebarba nos processos de fresamento e torneamento*. 59 p. Monografia (Projeto de Graduação) — Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015. Citado na página 12.

REED, R. C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. New York: Cambridge University Press, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 30.

SANTOS, A. G. dos. *Microfresamento de Aço Inoxidável Duplex UNS S32205 com Ferramentas de Metal Duro Revestidas com Nitreto de Titânio*. 107 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2016. Citado na página 44.

SANTOS, A. G. dos. *Investigação Experimental do Microfresamento da Liga de Titânio Ti-6Al-4V*. 156 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 44, 45 e 47.

SCHUELER, G.; ENGMANN, J.; MARX, T.; HABERLAND, R.; AURICH, J. Burr formation and surface characteristics in micro-end milling of titanium alloys. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-00568-8\\_14](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-00568-8_14)>. Citado 2 vezes nas páginas v e 15.

SHOKRANI, A.; NEWMAN, S. T. Hybrid cooling and lubricating technology for cnc milling of inconel 718 nickel alloy. *Procedia CIRP*, v. 77, p. 215–218, 2018. 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118311454>>. Citado na página 8.

SUN, W.; CHEN, Y.-Q.; LUO, G.-A.; ZHANG, M.; ZHANG, H.-Y.; WANG, Y.-R.; HU, P. Organs-on-chips and its applications. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, v. 44, n. 4, p. 533–541, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872204016609209>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 3.

TAKÁCS, M.; VERÖ, B.; MÉSZÁROS, I. Micromilling of metallic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 138, n. 1, p. 152–155, 2003. IMCC2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09240136>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 3.

TIABI, A. *Formation des bavures d'usinage et finition des pièces*. 197 p. Dissertação (Mestrado) — École de Technologie Supérieure - Université du Québec, Montréal, Canadá, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

UCUN, I.; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of inconel 718 super alloy. *Wear*, v. 300, n. 1, p. 8–19, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164813001257>>. Citado na página 18.

UCUN İrfan; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. The performance of dlc-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of inconel 718. *Precision Engineering*, v. 41, p. 135–144, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635915000033>>. Citado 4 vezes nas páginas 4, 18, 19 e 41.

UNIST. *Environmentaly Friendly Lubrication*. Disponível em: <<https://unist.com/pdf/coolube.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2021. Citado na página 31.

VEIGA, F. L.; FARIA, M. I. S. T.; COELHO, G. C. Superliga inconel-718: Caracterização microestrutural e validação da base de dados termodinâmicos. *Cadernos UniFOA - Centro Universitário de Volta Redonda*, Volta Redonda, RJ, p. 9, 2012. Citado na página 5.

VENKATESH, V.; SWAIN, N.; SRINIVAS, G.; KUMAR, P.; BARSHILIA, H. C. Review on the machining characteristics and research prospects of conventional microscale machining operations. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 32, n. 3, p. 235–262, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1151045>>. Citado na página 2.

WAN, Y.; CHENG, K.; SUN, S. An innovative method for surface defects prevention in micro milling and its implementation perspectives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, v. 227, n. 12, p. 1347–1355, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1350650113492507>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 14.

WU, X.; LI, L.; HE, N. Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting. *Precision Engineering*, v. 47, p. 191–196, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635916301684>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 13.

ZHANG, S.; LI, J.; WANG, Y. Tool life and cutting forces in end milling inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, v. 32, p. 81–87, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612001485>>. Citado na página 7.

ZIBEROV, M. Aplicação da microusinagem (miniaturização) nas artes plásticas – a obra de mykola syadristy. *Manufatura em Foco*, v. 5, n. 30, p. 22–23, 2017. Disponível em: <<https://www.manufaturaemfoco.com.br/aplicacao-da-microusinagem-miniaturizacao-nas-artes-plasticas-a-obra-de-mykola-syadristy/>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 1.

ZIBEROV, M. *Microfresamento da Liga Ti-6Al-4V com Microferramentas com Diferentes Revestimentos e Aplicação de MQL*. 132 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.

# Apêndices

# **A COBEM-2021-0129**

Artigo submetido ao Congresso Internacional de Engenharia Mecânica (COBEM)  
2021.



## COB-2021-0129

# INFLUENCE OF DEBURRING METHODS IN MICRO SLOTS OF INCONEL 718

### Gabriel de Paiva Silva

University of Brasília, Department of Mechanical Engineering, Asa Norte, Brasília – DF, Brazil, Zip code: 70.910-900  
dpaivagabriel@gmail.com

### Márcio Bacci da Silva

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Campus Santa Mônica – Uberlândia – MG, Brazil, Zip code: 38.408-100  
mbacci@ufu.br

### Déborah de Oliveira

University of Brasília, Department of Mechanical Engineering, Asa Norte, Brasília – DF, Brazil, Zip code: 70.910-900  
oliveira.deborah@unb.br

**Abstract.** *In view of the increasing trends towards miniaturization of components, machining processes have been trying to attain higher levels of dimensional and geometric quality. Micromilling cannot be analyzed with the same theories applied in the macro-scale process, because the cutting edge radius of the tool is greater than the minimum chip thickness, characterizing the size effect. One of the main issues associated with the quality of surfaces obtained by micromilling is the presence of burrs. Inconel 718 is a nickel super-alloy commonly used in aggressive conditions, such as nuclear and aerospace industries, due to its outstanding mechanical properties. This material is well known for its low machinability and it is frequently reported to exhibit burrs when micromilled. Deburring techniques often performed in traditional milling cannot always be performed in micromilled surfaces, since they might affect the dimensional accuracy and possibly damage the piece. Therefore, this work aims to investigate the effectiveness of deburring operations on slots obtained by micromilling of Inconel 718. In order to reduce potential damage on the surface, the abrasive deburring method was selected. Four different abrasive grit sizes were employed so that their abilities of removing the burrs could be analyzed. It was possible to notice that the abrasive size did not have high influence in the deburring. The selected method was able to reduce the burr heights from 350  $\mu\text{m}$  to 8  $\mu\text{m}$ , approximately. The analysis of the deburred surfaces indicates that despite the high burr removal, there was no damage in the slot geometry nor in the sample surface. Therefore, the selected methodology proved to be suitable for deburring slots in flat surfaces.*

**Keywords:** *Micromilling, Deburring Methods, Inconel 718, Surface Quality.*

## 1. INTRODUCTION

In the last few decades, micromanufacturing technologies have gained prominence. Research works in these fields have increased significantly because of the necessity of creation of highly compact components, with high levels of dimensional and geometric precision, especially in the biochemical, biotechnological, aerospace and electronics industries. There are high demands in the market for the creation of micro-components and for the addition of complex microscopic features in pre-existent pieces, in order to improve their functionalities.

The design of cutting tools used in traditional machining has been passing through continuous improvements in order to remove smaller and smaller chips. One of the principal micromachining processes is micromilling. According to Camara *et al.* (2012), the definition of micromilling is based on the dimensions of the cutting tool, which should range from 1  $\mu\text{m}$  to 1000  $\mu\text{m}$ . This process is highly versatile and is well suited, for instance, for the fabrication of microinjection molds (Takács *et al.*, 2003 and Chae *et al.*, 2006).

Inconel 718 is one of the most often used nickel super-alloys (Veiga *et al.*, 2012). Owing to its excellent mechanical properties, it is commonly expected to withstand high temperatures and stresses. However, it is known as a material of low machinability. Burrs of relatively large size are frequently observed in surfaces obtained by micromilling, especially in hard-to-cut materials such as Inconel 718. In some cases, the burr height can be even larger than the depth of cut (de Oliveira, 2019).

An important parameter when analyzing micromilling is the cutting tool wear. Considering the difficulties in directly measuring the wear of micromills, some authors recommend it to be evaluated indirectly by means of the dimensions of the microslot. According to Alhadeff *et al.* (2019), considering that the width of the micro slot decreases with the

micromill diameter, its measurement is a simple and efficient way to quantify the tool wear. Nevertheless, the presence of burrs may lead to imprecise measurements (Figure 1). It is desirable, thus, to use some deburring or edge finishing technique to properly remove the burrs, even though burr removal may be particularly difficult in microscale.

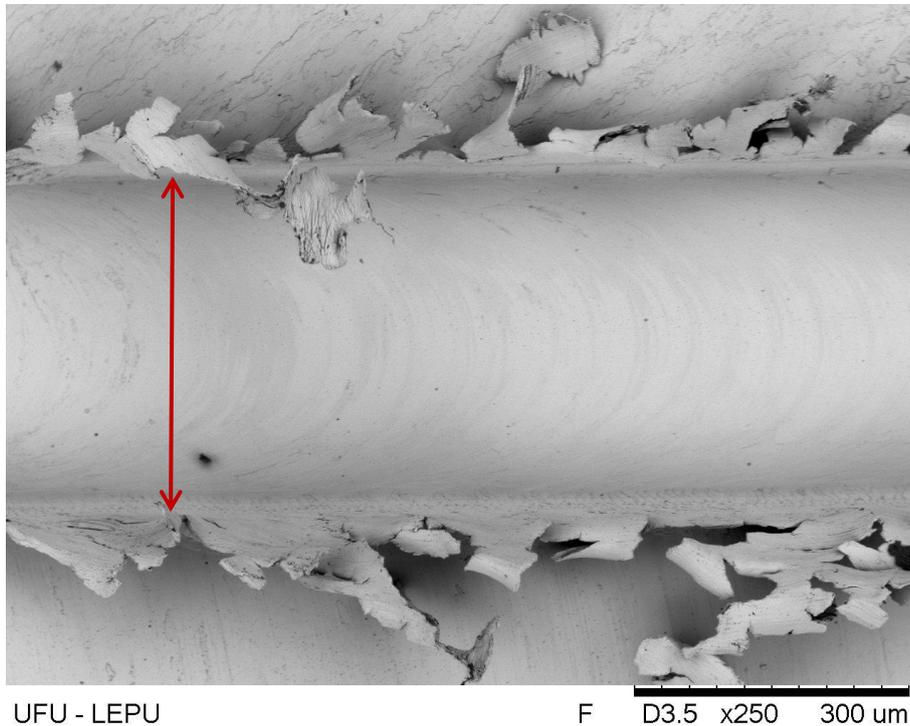


Figure 1. Large burrs hindering the precise measurement of the width of a slot obtained by micromilling.

Thus, considering the difficulties caused by the presence of burrs in micromilling, the objective of this work is to deburr micro slots on workpieces of Inconel 718 in order to evaluate the effectiveness of the chosen deburring method. For this purpose, the burr heights of the micro slots were measured before and after the deburring experiment. The surface quality of the slots was also evaluated qualitatively by means of microscopy images.

## 2. MATERIALS AND METHODS

In order to study the deburring process, two methodologies were employed: a literature analysis and experimental trials.

### 2.1 Literature analysis

For the literature analysis, an empirical research was conducted according to the methodology proposed by Flynn *et al.* (1990). The following terms were used for the research: micromachining, micromilling, Inconel 718, burr, burrs, deburring, abrasive deburring. This analysis was conducted to define the best procedures for the deburring method.

### 2.2 Micromilling trials

Micromilling was performed to obtain slots in Inconel 718 workpieces, whose chemical composition is presented in Table 1. Four different workpieces with dimensions 15 mm×10 mm×15 mm were used. The material was cast, and age hardened, and it has the properties presented in Table 2.

Table 1. Mechanical properties of Inconel 718 (de Oliveira *et al.*, 2019).

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Hardness (HRC)	Density at room temperature (g/cm <sup>3</sup> )	Melting Range (C)	Thermal Conductivity (W/mK)
1275	1034	200	40	8.22	1260 – 1336	11.4

Table 2: Chemical composition of Inconel 718 (de Oliveira *et al.*, 2019).

Element (wt.%)	C	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
	0.04	0.50	0.90	19.00	18.50	50.66	5.10	5.30

The tool is a micro end mill from Mitsubishi, its material is ultra-refined cemented carbide, and it is coated with (Al, Ti)N. The micromill has a 400  $\mu\text{m}$  diameter and 2 flutes. The machine tool was a Mini-mill / GX CNC, that has a maximum spindle speed ( $n$ ) of 60000 rpm and 3 axes with position resolution of 0.1  $\mu\text{m}$ , manufactured by Minitech Machinery Corporation.

The trials consisted in micromilling 12 slots, with 15 mm, in each workpiece, with the cutting parameters shown in Table 3. To perform the trials, cutting fluid was applied following the methodology proposed by de Oliveira *et al.* (2020), using the Coolube 2210EP, by UNIST, applied at a flow rate of 270.0 ml/h at 200 pulses per minute and an air pressure of 33 psi (0.23 MPa). The nozzle was positioned in the feed direction, and the distance between the nozzle and the cutting tool was kept constant.

Table 3. Cutting parameters.

Parameter	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Spindle speed $n$ (rpm)	11 000	20 000	11 000	20 000
Cutting speed $v_c$ (m/min)	13.8	25.1	13.8	25.1
Feed rate $v_f$ (mm/min)	110	200	110	200
Feed per tooth $f_z$ ( $\mu\text{m}/\text{tooth}$ )	5			
Axial depth of cut $a_p$ ( $\mu\text{m}$ )	40			
Radial depth of cut $a_e$ ( $\mu\text{m}$ )	400			

### 2.3 Deburring trials

As mentioned, the abrasive method was selected due to its characteristics that lead to less damage in the workpiece surface and the high industrial application. To perform the deburring tests, silicon carbide sandpaper sheets, with mesh sizes 800, 1200, 2000 and 3000, were selected. The deburring operation was carried out with a Pantec metallurgical polishing machine Polipan-U, with a constant rotation of 120 rpm. Each sample was polished for 30 s with different mesh sizes. Table 4 shows the combination between deburring and cutting parameters.

Table 4. Deburring parameters.

Sample	Mesh	Sanding time
1	800	30 s
2	1200	30 s
3	2000	30 s
4	3000	30 s

### 2.4 Burr heights measurement

The equipment used to measure the burr heights was a Confocal Laser Scanning Microscope Olympus Lext OLS4100. For each individual slot, the burr heights were measured three times so that the mean values with standard deviations could be obtained. For comparison reasons, the microscopy operations were conducted twice, once before and once after the deburring procedure. The equipment was also used to obtain the images of the slots in order to complement the study with a qualitative analysis.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Theoretic and experimental results were obtained. The theoretic results were based on a literature review, in order to understand the processes and nuances involved in the formation and removal of burrs in micromilling and on Inconel 718. The experimental results are based on the machining and deburring operations that were carried out.

#### 3.1 Theoretic Results

##### 3.1.1 Burrs in micromilling

The most important aspect that differs micromilling from macroscale milling is the size effect. This phenomenon is due to the fact that the edge of the microtool cannot be considered perfectly sharp as in traditional milling. Chip thickness in microscale can be typically comparable in size to the cutting edge radius of the tool and to the microstructure of the workpiece material. The rake angle is negative, with an intense plowing effect. It provokes a non-linear increase in the specific cutting energy, because a high amount of material needs to be in the plastic regime so that a small amount can be sheared in the form of chip. So, the size effect directly influences fundamental mechanisms in the cutting process, such as cutting force, chip formation, burr formation and quality of the machined surface (Aramcharoen and Mativenga, 2009).

The most frequent type of burrs in micromilling is Poisson burrs (Gillespie, 1973). These burrs are formed when the workpiece is extruded in the cutting direction by the straight rake face and the cutting edge arc of the tool. According to Wu *et al.* (2017), there is considerable interacting stress on the contact area between the workpiece and the tool, which causes the material to begin plastic deformation and flow along the minimum resistance direction. Since the effective rake angle in micromilling is negative, the flow of material in front of the tool is separated into two directions: some up the rake face - forming a chip - and some through the flank face to the machined surface - resulting in Poisson burrs. Wu *et al.* (2017) investigated the burr formation mechanism in micro cutting for burr minimization. The authors observed that the burr formation decreases to a minimum value when the uncut chip thickness reduces to the same size as the cutting edge radius, and then increases with further reduction of the uncut chip thickness due to the change of the maximum stress distribution.

Wan *et al.* (2013) and Kou *et al.* (2015) presented an innovative method to prevent burrs which consists in using a kind of support material to be deposited on the workpiece surface. This material provides auxiliary support force and increases the stiffness of the original edge of the workpiece, preventing plastic deformations further increasing at the edge of the piece. When the tool radius slides over the edge of the workpiece, the primary shear zone, the plastic zone and the elastic zone are extended to the supporting material. Therefore, the burrs are generated on the support material instead of the workpiece. The material used as support should be carefully selected: it needs to be easy to be deposited and removed from the workpiece; it must not pollute the workpiece; it should have enough strength so as to prevent burr generation; and it should be recycled for cost reduction. Wan *et al.* (2013) conducted experiments in aluminum alloy 7050-T7451 with two different support materials, namely a wax and a low melting point alloy (LMPA). The authors observed that the wax provided undesirable results, seeing that its low strength doesn't prevent the occurrence of burrs on the aluminum. The LMPA was able to avoid burrs formation, even though the proposed method is difficult to be applied in micromanufacturing industry since there is no automatic controlled LMPA deposition or coating system that is able to provide a more accurate coating layer on the workpiece and the consequent highly productive burrs-free micromachining process. Kou *et al.* (2015), on the other hand, used an instant adhesive composed of  $\alpha$ -ethyl cyanoacrylate as support material and conducted experiments in a beryllium bronze workpiece. The authors' results showed that burrs did not appear on the workpiece surface after the instant adhesive was removed and EDS analysis revealed that there was no contamination on the workpiece surface.

##### 3.1.2 Micromilling of Inconel 718

Inconel 718 is one of the most used nickel-based super-alloys. It has been often used in applications that involve exposure to high temperatures and stresses, because it has excellent mechanical resistance, high strength and good corrosion resistance. These desirable properties of Inconel 718, however, result in low machinability. Since it is widely known as a hard-to-cut material, this super-alloy has been the subject of several recent research works seeking to improve its machinability under different machining conditions. In general, it has been observed that burrs of large dimensions are frequent in micromilling of Inconel 718 and they are usually difficult to avoid.

FANG *et al.* (2020) conducted a comparative study of two different machining methods on Inconel 718: traditional micromilling (TMM) and ultrasonic vibration assisted micromilling (UVAMM). This latter technique consists in applying ultrasonic vibrations periodically on the workpiece or on the cutting tool in order to avoid tool wear and improve finished surface quality. The authors' results show that UVAMM is more efficient in reducing burrs and improving the surface quality compared with TMM, in which pits, bumps and gullies are often formed.

Other factors that affect machinability in micro scale include lubrication techniques and coating of the cutting tool. Aslantas and Çiçek (2018) investigated the effects of different cooling conditions when micromilling Inconel 718. It was

observed that ethanol is an inefficient lubricant for this material, because it causes intense reduction of the tool diameter and large burr size. In addition, the burrs formed under dry cutting condition adhered to the sides of the slots, as a result of excessive growth of the cutting edge radius. Minimal Quantity Lubricant (MQL) was considered the most efficient lubrication method in micromilling Inconel 718 because it caused minimal tool wear and better surface quality.

Ucun *et al.* (2013) conducted an experimental investigation on the effects of the coating material on tool wear in micromilling of Inconel 718. Flank wear was observed due to the abrasive wear mechanism, which is the most frequent wear type. Because of fatigue, the formation of built-up edges and local fractures on the cutting edges and sides of the cutting tools were observed. The authors noticed that lower levels of wear and lower diameter changes occur in the coated tools compared to the uncoated ones, which is attributed to the high hardness values and low friction coefficients of the coated materials. It can be noticed that the cutting edge radius in micro tools is strongly dependent on wear and the lubricating technique contributes significantly to the cutting performance. Moreover, the authors showed strong evidence that the MQL process significantly enhances tool life and prevents chip adherence.

### 3.1.3 Deburring in Micromilling

In general, the removal of burrs originated from machining processes is desirable because these burrs may directly influence the performance, safety, cost and appearance of the manufactured product. There is a wide variety of deburring methods available, the most common of which being manual and abrasive methods, according to Gillespie (1999). However, the deburring techniques used in macromilling cannot always be used in micromilling since they may cause dimensional errors and residual stresses in the components, in such a way that the removal of burrs in microscale is particularly difficult (Khan *et al.*, 2019).

Mathai and Melkote (2012) performed an experimental characterization of the deburring rate in slots obtained by micromilling. The deburring method used by the authors consists in using a rotating nylon brush over the part in the presence of an abrasive slurry, which is a simple and inexpensive technique. The parameters considered by the authors were the abrasive grit type, grit size and spindle speed. It was concluded that the deburring rate is proportional to the initial burr height, with an almost constant proportionality for the conditions of the studied carried out. No clear trend was evident for the influence of grit size. In general, this study showed that abrasive brushing can efficiently remove large burrs and enhance surface quality in slots obtained by micromilling in copper alloys.

It can be observed that abrasive deburring methods are efficient in removing burrs. Besides, these methods are highly versatile, being present in the majority of industries. These facts, associated with the low cost of abrasive methods and its easy handling by the operator, justify their use in this work.

### 3.2 Experimental results

The mean values of burr heights of the slots before and after the deburring process are presented in Figs. 2, 3, 4 and 5, with their respective standard deviations.

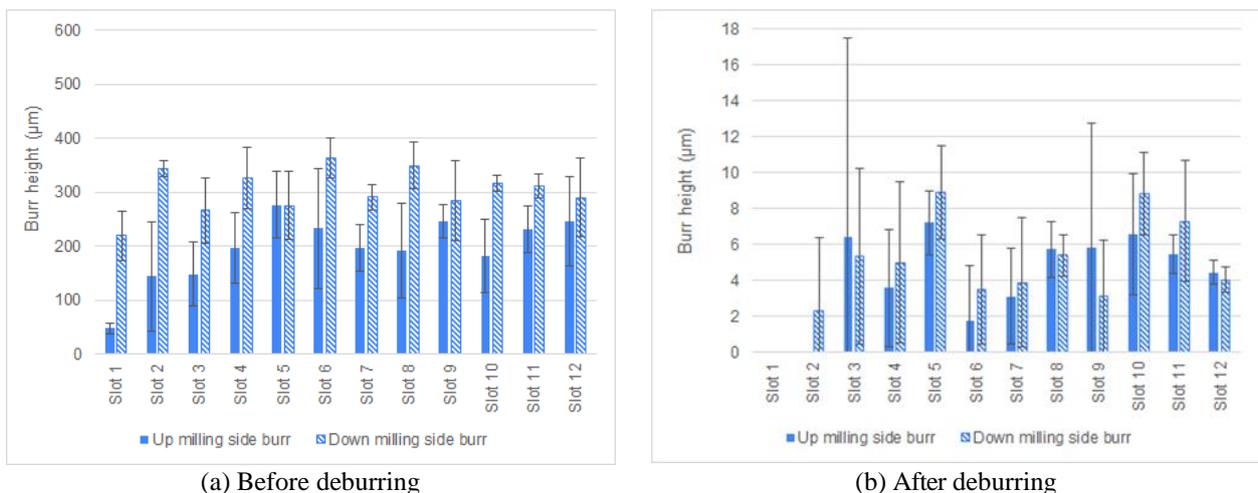
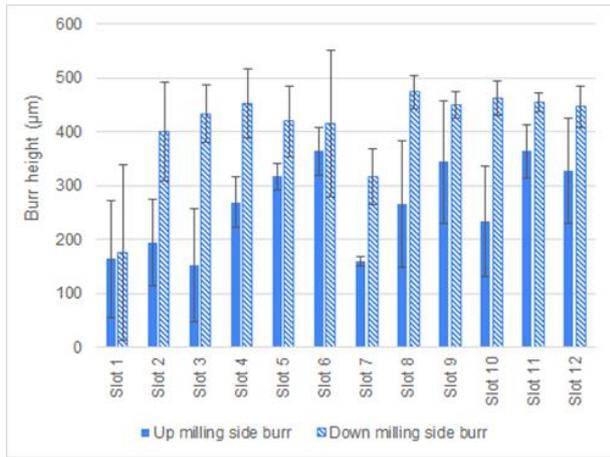
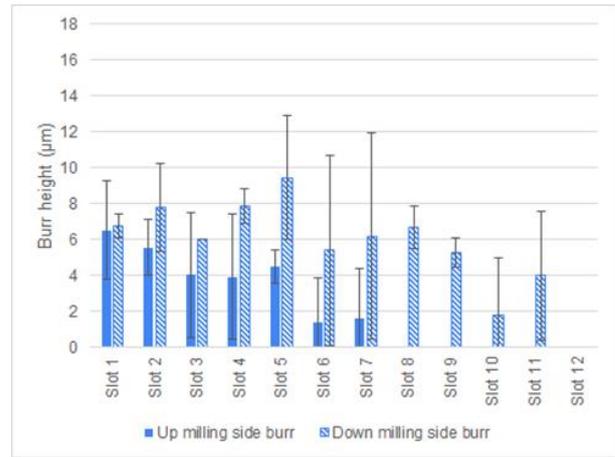


Figure 2. Sample 1.

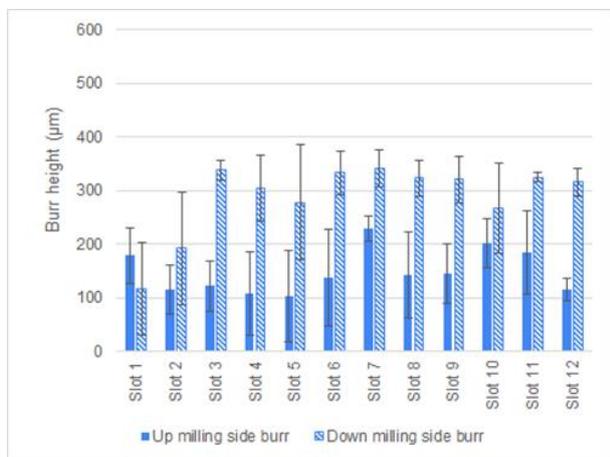


(a) Before deburring

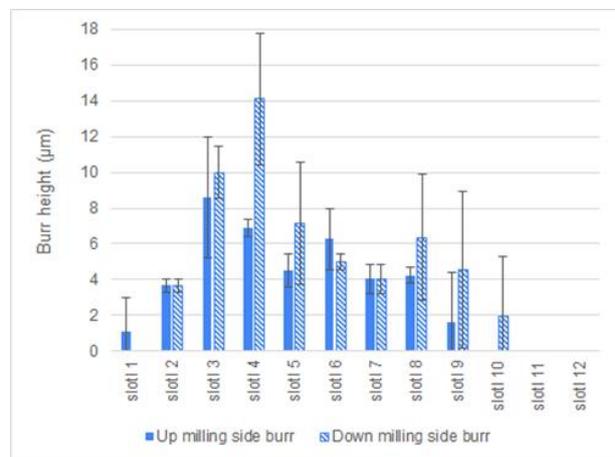


(b) After deburring

Figure 3. Sample 2.

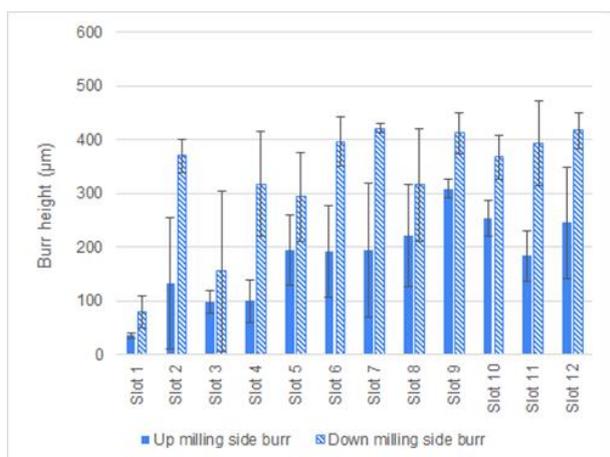


(a) Before deburring

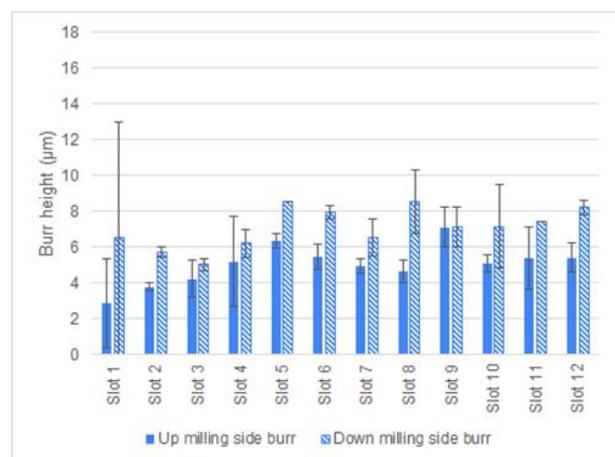


(b) After deburring

Figure 4. Sample 3.



(a) Before deburring



(b) After deburring

Figure 5. Sample 4.

By the figures 2 (a), 3 (a), 4 (a) and 5 (a), it can be noticed that the cutting velocity did not had influence in the burrs height, once the values for the Tests 1, 3 and 4 presented values close to 350 µm regardless of the fact that the first test was performed with the lower cutting velocity. It is also possible to notice that there were differences in the up milling and down milling burrs height, with the burrs in the up milling side being smaller than the burrs in the down milling side.

This was also observed by dos Santos *et al.* (2018), in micromilling duplex stainless steel UNS 32205, with a 381  $\mu\text{m}$  diameter micromill, TiN coated, with different processes of cooling lubrication. The authors verified that the burrs in the down milling side are higher, regardless of the cooling lubricant used. However, for dry cutting, the authors mentioned that both sides presented bigger burrs, with the down milling side presenting burrs up to four times higher when compared to the lubricated condition.

When comparing the burr height values before and after the deburring, it is possible to notice that for all the samples the reduction was significant. The burr heights reduced from 350  $\mu\text{m}$  to 8  $\mu\text{m}$ , approximately, which means an approximate reduction of 98% in the burrs height, with a 30 s process. All the different meshes applied were able to remove the burrs, the one that presented the worse results was the mesh 2000, in which the slot 4 presented the highest burr height after deburring (14  $\mu\text{m}$ ).

Another characteristic that stands out in the figures 2 (a), 3 (a), 4 (a) and 5 is the high standard deviation that can be seen, in the same order of magnitude of the mean values. The high standard deviation was also observed by Aramcharoen and Mativenga (2009) when micromilling tool steel. The authors verified differences up to 80  $\mu\text{m}$ . It occurs due to the burr characteristic in micromilling. To exemplify the burr characteristic that lead to the high standard, figure 6 (a) contains a representative slot of a sample before deburring.

In figure 6 (b), it is also possible to notice that the deburring method did not compromise the slot geometry. In a qualitative analysis (by the images), there were no significant variation neither in the bottom of the slot nor in the part surface, which indicates that for deburring slots in flat surfaces, the abrasive methods can be applied. It is worth mentioning that for figure 6, slot 12 of sample 2 is used to represent the average effect of the sanding trial on the removal of burrs, regardless of the sample and the slot number.

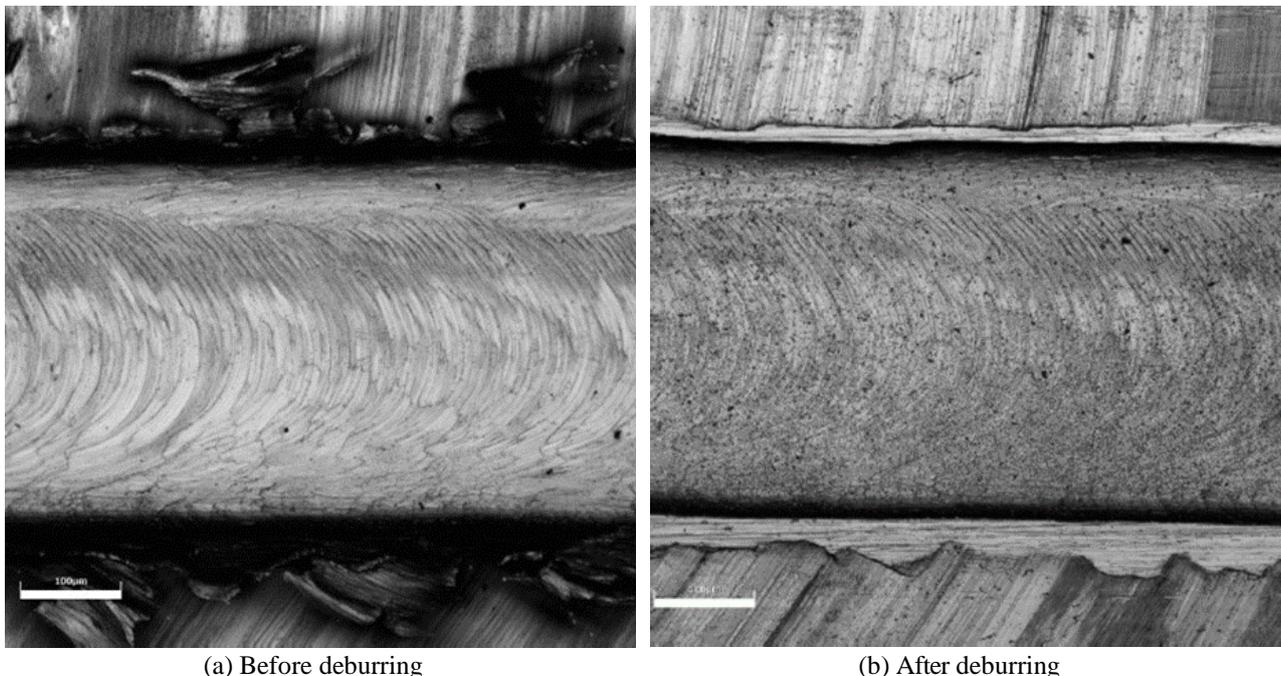


Figure 6. Slot 12 from sample 2.

#### 4. CONCLUSIONS

With the combination of literature review, the experimental results of the machining and the deburring process of Inconel 718 micromilled slots, the following conclusions could be drawn:

- It was possible to notice little interference of the cutting velocity in the burrs height, indicating that other cutting parameters can be studied in order to minimize the burr formation.
- The methodology of measuring the burrs by their heights presented high standard deviation values, due to the burr irregular characteristics, and therefore, it indicates that it should be associated to other information to completely characterize the process.
- According to the literature, the manual and abrasive methods are simple, versatile and have a low cost associated with their handling and operator training.
- The abrasive deburring trials were consistent with what is expected from literature and could promote a reduction in the burrs height of approximately 98% with a deburring time of only 30 s, indicating it is a promising method for deburring slots in flat surfaces.

## 5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to CAPES, CNPq, FAPEMIG and to the Decanato de Ensino de Graduação of the University of Brasilia.

## 6. REFERENCES

- Alhadeff, L., Marshall, M., Curtis, D. and Slatter, T., 2019. "Protocol for tool wear measurement in micro-milling". *Wear*, Vol. 420-421, pp. 54–67.
- Aramcharoen, A. and Mativenga, P., 2009. "Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel". *Precision Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 402–407.
- Aslantas, K. and Çiçek, A., 2018. "The effects of cooling/lubrication techniques on cutting performance in micro-milling of inconel 718 superalloy". *Procedia CIRP*, Vol. 77, pp. 70–73.
- Camara, M., Rubio, J.C., Abrão, A. and Davim, J., 2012. "State of the art on micromilling of materials, a review". *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 28, No. 8, pp. 673–685.
- Chae, J., Park, S. and Freiheit, T., 2006. "Investigation of micro-cutting operations". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 3, pp. 313–332.
- de Oliveira, D., 2019. *Efeito Escala e Integridade Superficial no Microfresamento da Liga de Níquel Inconel 718*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- de Oliveira, D., Gomes, M.C. and da Silva, M.B., 2019. "Spheroidal chip in micromilling". *Wear*, Vol. 426-427, pp. 1672–1682.
- de Oliveira, D., Gomes, M.C. and da Silva, M.B., 2020. "Influence of cutting fluid application frequency on the surface quality of micromilled slots on inconel 718 alloy". *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, pp. 553–558.
- dos Santos, A.G., da Silva, M.B. and Jackson, M.J., 2018. "Tungsten carbide microtool wear when micro milling UNS32205 duplex stainless steel". *Wear*, Vol. 414- 415, pp. 109–117. ISSN 0043-1648.
- Fang, B., Yuan, Z., Li, D. And Gao, L., 2020. "Effect of ultrasonic vibration on finished quality in ultrasonic vibration assisted micromilling of inconel718". *Chinese Journal of Aeronautics*.
- Flynn, B.B., Sakakibara, S., Schroeder, R.G., Bates, K.A. and Flynn, E., 1990. "Empirical research methods in operations management". *Journal of Operations Management*, Vol. 9, No. 2, pp. 250–284
- Gillespie, L.K., 1999. *Deburring and edge finishing handbook*. Society of Manufacturing Engineers, New York.
- Gillespie, L.K., 1973. *The Formation and Properties of Machining Burrs*. Master's thesis, Utah State University, Logan, Utah, EUA.
- Khan, K., Varghese, A., Dixit, P. and Joshi, S.S., 2019. "Effect of tool path complexity on top burrs in micromilling". *Procedia Manufacturing*, Vol. 34, pp. 432–439.
- Kou, Z., Wan, Y., Cai, Y., Liang, X. and Liu, Z., 2015. "Burr controlling in micro milling with supporting material method". *Procedia Manufacturing*, Vol. 1, pp. 501–511.
- Mathai, G. and Melkote, S., 2012. "Effect of process parameters on the rate of abrasive assisted brush deburring of microgrooves". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 57, pp. 46–54.
- Takács, M., Verő, B. and Mészáros, I., 2003. "Micromilling of metallic materials". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, No. 1, pp. 152–155.
- Ucun, I., Aslantas, K. and Bedir, F., 2013. "An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of inconel 718 super alloy". *Wear*, Vol. 300, No. 1, pp. 8–19.
- Veiga, F.L., Faria, M.I.S.T. and Coelho, G.C., 2012. "Superliga inconel-718: Caracterização microestrutural e validação da base de dados termodinâmicos." *Cadernos UniFOA - Centro Universitário de Volta Redonda*, p. 9.
- Wan, Y., Cheng, K. and Sun, S., 2013. "An innovative method for surface defects prevention in micro milling and its implementation perspectives". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 227, No. 12, pp. 1347–1355.
- Wu, X., Li, L. and He, N., 2017. "Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting". *Precision Engineering*, Vol. 47, pp. 191–196.

## 7. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.

# Anexos

# A Relatório de medição de rugosidade

Valores de rugosidade do canal 12 da amostra obtida através do ensaio de micro-fresamento a 20000 rpm antes da rebarbação.

# canal 12

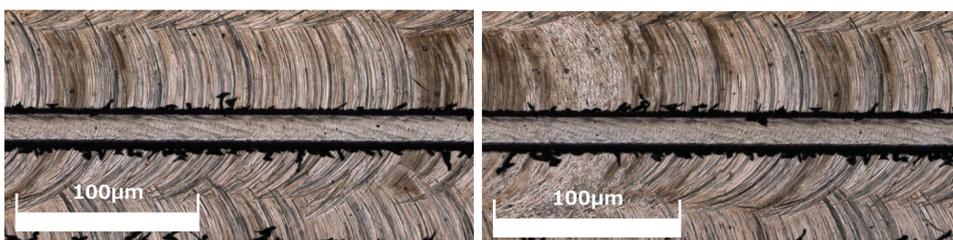


Image Name:7-5CFM\_636  
 [Roughness Settings Information]  
 Measurement No.:3  
 Evaluation area:4833µm  
 Cutoff: λc 800.000 µm  
           λs -- µm  
           λf -- µm  
 Filter:Gaussian Filter  
 Analysis parameter:R parameter

7-5CFM\_636  
 [Acquisition parameters]  
 Scanning mode: Roughness  
 Image size[pixels]: 19350X1  
 Image size[µm]: 4838 µm  
 Objective lens: MPLAPONLEXT50x  
 Zoom: 1x  
 DIC: Off

No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	Rq[µm]	Rsk	Rku	Rsm[µm]	RΔq[°]	Rδc[µm]	Rmr[%]	Rzjis[µm]	λc[µm]	λs[µm]	λf[µm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	0.882	0.580	1.462	0.733	3.309	0.150	0.200	0.455	7.649	128.288	6.697	0.307	100.000	1.559	800.00	-	-	7-5CFM
<input checked="" type="checkbox"/>	2	0.532	0.534	1.067	0.665	1.318	0.143	0.179	-0.065	2.961	124.137	4.711	0.304	100.000	1.024	800.00	-	-	7-5CFM
<input checked="" type="checkbox"/>	3	1.508	0.580	2.088	0.924	6.284	0.173	0.280	0.523	7.732	149.077	8.677	0.313	100.000	1.037	800.00	-	-	7-5CFM

User ID: ADMIN  
 User name: Administrator  
 Description: FIRST ADMINISTRATOR USER

Comment