



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Influência do tempo de polimento na qualidade da rebarbação de microcanais em Inconel 718

Por

Marcelo Lopes Araujo

Brasília, 26 de setembro de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Influência do tempo de polimento na qualidade da rebarbação de microcanais em Inconel 718

Por

Marcelo Lopes Araujo

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

Banca Examinadora

Profa. Dra. Déborah de Oliveira UnB/ENM
(Orientadora)
Prof. Dr. Maksym Ziberov Dr UnB/ENM
Prof. Dra. Aline Gonçalves dos Santos UFCAT

Brasília 26 de setembro de 2022

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

AA663i Araujo, Marcelo Lopes
Influência do tempo de polimento na qualidade da
rebarbação de microcanais em Inconel 718 / Marcelo Lopes
Araujo; orientador Déborah de Oliveira. -- Brasília, 2022.
56 p.

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

1. Microfresamento. 2. Inconel 718. 3. Rebarbação. 4.
Acabamento superficial. 5. Polimento. I. Oliveira, Déborah
de , orient. II. Título.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus.

A minha avó Diolina, exemplo de vida para mim, que sempre me apoiou e incentivou a correr atrás dos meus sonhos.

Aos meus pais, Marcos e Mônica, e irmão Marcos, por sempre estarem do meu lado, acreditando no meu potencial, e me aconselhando.

A toda minha família, especialmente as minhas tias: Ivone e Marli, que me acompanharam desde a base escolar e me incentivaram a entrar no ensino superior, ao meu tio Unilsom que me levou ao meu primeiro dia na escola, me incentivando a seguir aquele caminho desde então. Agradeço também ao meu primo Rafael, que compartilhou comigo sua experiência prévia na Universidade de Brasília, e amigos que criei durante graduação, que levarei para além da universidade.

À minha orientadora, professora Dra. Déborah de Oliveira, por compartilhar seu conhecimento, e sempre estar à disposição para tirar minhas dúvidas, acreditar no meu potencial e permitir que eu me tornasse seu orientando.

À Universidade de Brasília, que me abriu várias portas, me permitiu crescer não só como aluno, mas como pessoa.

Ao técnico Ivan Reis pelo treinamento e disponibilidade para ajudar na utilização dos equipamentos do laboratório, aos colaboradores da SG 09, que sempre foram prestativos e educados.

Por fim, agradeço a todos, que de alguma forma participaram, ou contribuíram para o meu desenvolvimento, ao longo do meu período acadêmico.

Resumo

A aplicação de produtos miniaturizados em diversos setores, requer a utilização de métodos de fabricação, que atendam os requisitos da escala micro, uma vez que os processos tradicionais não conseguem atendê-los, e para suprir essa demanda há os processos de microusinagem. Dentre eles, o microfresamento é amplamente utilizado. Ao microfresar uma peça enfrenta-se alguns desafios, como o efeito escala, que ocorre devido a microestrutura da peça estar em escala próxima à dimensão da cunha de corte da ferramenta; desse modo, o comportamento do material não pode ser considerado igual à usinagem convencional, onde a aresta de corte é considerada perfeitamente afiada. Na escala micro, a espessura de corte é muito pequena, às vezes até inferior à espessura mínima de corte, de modo que ao invés da geração de cavaco, ocorre deformação plástica na superfície da peça, o que propicia o surgimento de rebarbas. Para a remoção das rebarbas é necessário um processo de rebarbação. Na escala macro, a rebarbação abrasiva é um dos métodos mais empregados, devido à sua versatilidade, facilidade de execução, elevada precisão e baixo custo. Considerando esses fatores, este trabalho analisou a influência do tempo de polimento na qualidade da rebarbação de microcanais em Inconel 718, a partir da rebarbação abrasiva, através do polimento mecânico com pasta de diamante como abrasivo. O processo ocorreu de forma manual, sem utilização de máquinas rotativas. A amostra foi movimentada contra o pano de polimento com abrasivo em um percurso definido. Todos os 12 microcanais de cada uma das 2 amostras de Inconel 718, foram rebarbados nos intervalos de 1, 2 e 4 min. Após os ensaios de rebarbação, foi possível notar que não houve dano ao microcanal, tanto qualitativamente como em termos de rugosidade. As rebarbas apresentaram um comportamento geral de redução de altura, atingindo até 68,5 % de redução. Foi observada a diferença de tamanho entre as rebarbas concordantes e discordantes. A rugosidade apresentou valores menores após a rebarbação. Alguns canais apresentaram aumento na rugosidade e no tamanho das rebarbas após a rebarbação, que pode estar relacionado a presença de fragmentos de rebarba, fios do pano de polimento no fundo dos microcanais, achatamento e alongamento das rebarbas durante a cinemática do polimento.

Palavras-chaves: Microfresamento, Inconel 718, Rebarbação, Acabamento Superficial.

Abstract

The application of miniaturized products in several sectors requires the use of new manufacturing methods that meet the requirements of the micro scale, since traditional processes cannot meet them, and to meet this demand there are micromachining processes. Among them, micromilling is widely used. When micromilling a part, some challenges are faced, such as the size effect, which occurs due to the fact that the microstructure of the part is close to the scale of the dimension of the tool's cutting wedge; therefore, the behavior of the material cannot be considered equal to conventional machining, where the cutting edge is considered to be perfectly sharp. For the micro scale, the cut thickness is very small, sometimes even less than the minimum cut thickness, so that instead of chip generation, plastic deformation occurs on the surface of the part, which leads to the appearance of burrs. To remove burrs, a deburring process is required. On the macro scale, abrasive deburring is one of the most used methods, due to its versatility, ease of execution, high precision and low cost. Considering these factors, this work analyzed the influence of polishing time on the quality of deburring of microchannels in Inconel 718, from abrasive deburring, through mechanical polishing with diamond paste as abrasive. The process took place manually, without the use of rotating machines. The sample was moved against the polishing cloth in a defined path. All 12 microchannels of each of the 2 samples of Inconel 718 were deburred at 1, 2 and 4 min intervals. After the deburring tests, it was possible to notice that there was no damage to the microchannel, both qualitatively and in terms of roughness. The burrs showed a general height reduction behavior, reaching up to 68.5 % reduction. The size difference between up milling and down milling burrs was observed. The roughness showed lower values after deburring, Some channels showed an increase in roughness and in the size of the burrs after deburring, which may be related to the presence of burr fragments, threads of the polishing cloth at the bottom of the microchannels, flattening and elongation of the burrs during the polishing kinematics.

Key-words: Micromilling, Inconel 718, Deburring, Surface Finishing.

Lista de Figuras

Figura 1 – Diferentes aplicações da miniaturização.	2
Figura 2 – Aspecto geral das rebarbas nas saídas dos canais. Fonte: (OLIVEIRA, 2019).	3
Figura 3 – Grande rebarba próxima a saída do canal. Fonte: (OLIVEIRA, 2019).	3
Figura 4 – Motor aeronáutico turbofan: Trent 800, utilizado no Boeing 777. Fonte: (REED, 2006).	5
Figura 5 – Usinabilidade relativa para metais. Fonte: (EZUGWU, 2005).	8
Figura 6 – Espessura de corte na (a) macrousinagem e na (b) microusinagem. Adaptado de (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).	10
Figura 7 – Formação de cavacos em relação à espessura mínima de cavacos na usinagem em microescala. Adaptado de (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).	11
Figura 8 – Rebarba de Poisson. Adaptado de (GILLESPIE, 1999).	12
Figura 9 – Rebarba de entrada. Adaptado de (GILLESPIE, 1999).	12
Figura 10 – Representação esquemática da rebarba de encurvamento. Adaptado de (KOU et al., 2015).	13
Figura 11 – Rebarbas de rasgos durante formação de cavaco. Adaptado de (GILLESPIE, 1999).	13
Figura 12 – Processo de formação da rebarba primária. Adaptado de (CHERN et al., 2007).	14
Figura 13 – Rebarbas após microfresamento, ampliação em 100x, (a) rebarba primária, (b) rebarba em forma de agulha, (c) rebarba em forma de pena e (d) rebarba menor. Adaptado de (CHERN et al., 2007).	14
Figura 14 – Forma e localização de rebarbas obtidas após microfresamento. Fonte: (ZIBEROV, 2018).	15
Figura 15 – micro fresa de topo com 127 μ m de diâmetro. Fonte:(LEE; STIRN; DORNFELD, 2002).	16
Figura 16 – Rebarbas formadas no microfresamento de topo (ferramenta gira no sentido horário). Adaptado de (LEE; STIRN; DORNFELD, 2002).	17
Figura 17 – Princípio básico da lapidação. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).	18

Figura 18 – Princípio básico do polimento. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).	19
Figura 19 – Remoção de material vs tempo, para abrasivo de diamante com grão de (a) $1\mu m$ e (b) $25\mu m$. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).	21
Figura 20 – Rugosidade média vs tempo, para abrasivo de diamante com grão de (a) $1\mu m$ e (b) $25\mu m$. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).	21
Figura 21 – Princípio básico do polimento. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).	22
Figura 22 – Esquema do processo de rebarbação: (a) elementos do sistema, (b) vista detalhada do cubo, (c) vista detalhada das rebarbas e (d) penetração da escova. Adaptado de (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).	23
Figura 23 – Configuração experimental: (a) Configuração para rebarbação, (b) vista detalhada da escova posicionada para rebarbação. Adaptado de (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).	23
Figura 24 – Microcanal antes e após a rebarbação, (a) antes da rebarbação, (b) após duas passagens (FASE I), (c) vista detalhada da borda após duas passagens, (d) após mais duas passagens (FASE II) e (e) vista detalhada da borda após mais duas passagens. Adaptado de (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).	24
Figura 25 – Mecanismo de remoção de rebarba: (a) antes da passagem da rebarba, (b) remoção da rebarba pela cerda da escova, (c) rebarba residual. Adaptado de (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).	25
Figura 26 – Dimensões e geometria das amostras de Inconel 718.	26
Figura 27 – Microferramenta MS2MSD0040. Adaptado de (Mitsubishi, 2022).	27
Figura 28 – Esquema dimensões e forma dos microcanais das amostras de Inconel 718. Adaptado de (OLIVEIRA, 2019).	28
Figura 29 – Esquema do percurso de rebarbação e medidas do percurso.	29
Figura 30 – Esquema do processo de polimento manual.	30
Figura 31 – Microscópio utilizado no experimento com amostra posicionada, para levantamento das variáveis de saída.	31
Figura 32 – Medição da rugosidade.	32
Figura 33 – Medição da rebarba.	33
Figura 34 – Valores de rugosidade antes e após rebarbação para o ensaio.	34
Figura 35 – Valores de rugosidade antes e após rebarbação para a réplica.	34
Figura 36 – Presença de rebarbas no fundo do canal 11 da réplica.	35
Figura 37 – Presença de rebarbas no fundo do canal 3 do ensaio.	36
Figura 38 – Presença de rebarbas no fundo do canal 4 do ensaio.	36
Figura 39 – Presença de rebarbas no fundo do canal 6 do ensaio.	36
Figura 40 – Presença de fios do pano de polimento no canal 7 da réplica.	37
Figura 41 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio antes de rebarbar.	38
Figura 42 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio após 1 minuto de rebarbação.	38
Figura 43 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio após 2 minutos de rebarbação.	39
Figura 44 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio após 4 minutos de rebarbação.	39

Figura 45 – Valores de altura de rebarbas para a réplica antes de rebarbar.	40
Figura 46 – Valores de altura de rebarbas para a réplica após 1 minuto de rebarbação.	40
Figura 47 – Valores de altura de rebarbas para a réplica após 2 minutos de rebarbação.	40
Figura 48 – Valores de altura de rebarbas para a réplica após 4 minutos intervalo de rebarbação.	41
Figura 49 – Região central do canal 10 do ensaio antes e após rebarbação.	42
Figura 50 – Região central do canal 10 da réplica antes e após rebarbação.	43
Figura 51 – Valores de altura de rebarbas concordantes para o ensaio antes e após intervalos de rebarbação.	44
Figura 52 – Valores de altura de rebarbas discordantes para o ensaio antes e após intervalos de rebarbação.	44
Figura 53 – Valores de altura de rebarbas discordantes para a réplica antes e após intervalos de rebarbação.	44
Figura 54 – Valores de altura de rebarbas discordantes para a réplica antes e após intervalos de rebarbação.	44
Figura 55 – Região central do canal 4 da réplica antes e após rebarbação.	45
Figura 56 – Diferentes regiões do micro canal 12 do ensaio. Fonte: (SILVA, 2021).	46
Figura 57 – Região central do canal 11 da réplica antes e após rebarbação.	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Composição do Inconel 718. Adaptado de (DAVIS; COMMITTEE, 2000).	7
Tabela 2 – Propriedades mecânicas para diferentes materiais (adaptado de Davis e Committee (2000), Callister (2006), ThyssenKrupp (2022)).	7
Tabela 3 – Parâmetros de corte para microfresamento de alumínio 6061-T6.	16
Tabela 4 – Dureza de alguns materiais abrasivos. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).	20
Tabela 5 – Composição química teórica do Inconel 718 conforme (REED, 2006). . .	27
Tabela 6 – Parâmetros de corte utilizados (OLIVEIRA, 2019).	28

Lista de abreviaturas e siglas

CFC	Cúbica de face centrada
TET	Temperatura de entrada da turbina
HRC	Dureza Rockwell escala C
MRR	Taxa de remoção de material
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQL	Mínima quantidade de lubrificação

Lista de símbolos

Símbolos latinos

$\gamma, \gamma', \gamma''$	Fases da microestrutura de uma superliga de níquel
Re	Raio de aresta
Ra	Rugosidade média
h	Espessura de corte
h_m	Espessura mínima de corte

Sumário

	1	INTRODUÇÃO	1
1.1		Objetivo	4
	2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1		Inconel 718	5
2.2		Microfresamento	8
2.2.1		Efeito escala	10
2.2.2		Rebarbas	11
2.3		Rebarbação	17
2.3.1		Métodos abrasivos	18
2.3.2		Rebarbação na microusinagem	22
	3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1		Caracterização do material	26
3.2		Microfresamento das Amostras	27
3.3		Rebarbação das amostras	28
3.4		Variáveis de saída	30
3.4.1		Medição da rugosidade	31
3.4.2		Medição de altura das rebarbas	32
	4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1		Rugosidade	34
4.2		Altura das Rebarbas	37
4.3		Evolução Altura das Rebarbas	43
	5	CONCLUSÃO	49
5.1		Sugestões para trabalhos futuros	49
		REFERÊNCIAS	51
		ANEXO A CONEM 2022	56

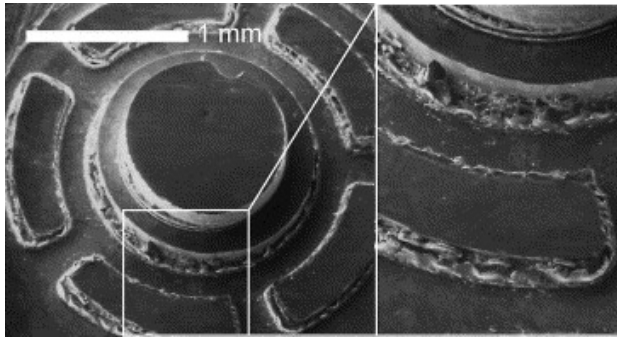
1 Introdução

O processo de microusinagem é uma tecnologia de microfabricação em desenvolvimento, devido à constante demanda por produtos miniaturizados nos últimos anos, a fim de suprir as necessidades de maiores reduções de tamanho, peso, melhor eficiência nos consumos de energia, e maior portabilidade em aplicações comerciais e não comerciais (WOON et al., 2008).

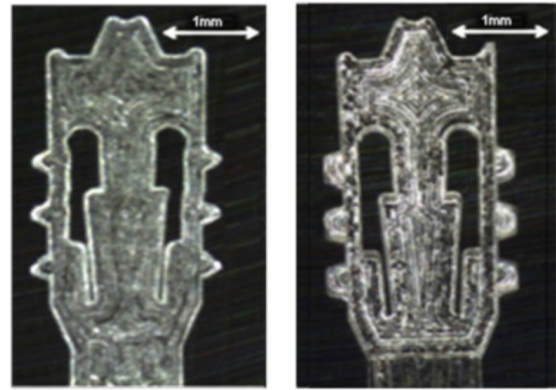
A miniaturização dos sistemas, mecânicos, fluídicos e ópticos se encontram em desenvolvimento, quando comparada à fabricação macro. Conforme novas áreas de aplicação para esses sistemas são exploradas, surgem novos requisitos (WEULE; HUNTRUP; TRITSCHLER, 2001). Segundo Weck, Fischer e Vos (1997) a miniaturização de componentes e sistemas, avança constantemente em muitas áreas da engenharia, como na produção de sensores miniaturizados, que são utilizados em produtos produzidos em massa.

A fabricação de peças em miniatura, vão além do setor tecnológico. De acordo com De Cristofaro et al. (2012), a demanda por peças miniaturizadas abrange ainda as áreas médica, de transporte e ambiental. A aplicação de produtos miniaturizados na produção de micromoldes foram estudadas por Takacs, Verö e Meszaros (2003) e Vazquez et al. (2015), os formatos dos micromoles, podem ser observados na Figura 1(a,b).

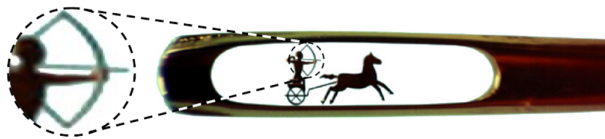
Ziberov (2018) apresenta a miniaturização empregada no setor das artes, como pode ser observado na Figura 1(c), que é uma das obras de Mykola Syadristy, nomeada como "poesia", a obra é uma composição feita em ouro, e está situada dentro de uma agulha comum, a espessura da seta e a corda do arco é de $0,2\mu m$, aproximadamente 400 vezes menor do que um fio de cabelo humano. Outra aplicação interessante dos componentes em miniatura é no campo da medicina. Uma combinação das tecnologias da microusinagem, microfluídica e biologia celular, como pode ser observado na Figura 1(d), que representa um "órgão-em-chip", tecnologia capaz de imitar as estruturas, e funções complexas dos órgãos humanos.



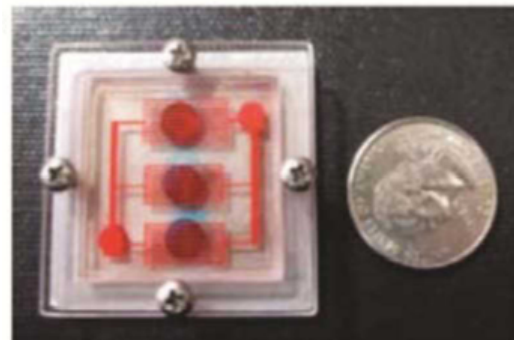
(a) Micromolde. Fonte: (TAKACS; VERÖ; MESZAROS, 2003).



(b) Micromolde. Fonte: (VAZQUEZ et al., 2015).



(c) Composição de Mykola Syadristy. Fonte: (ZIBEROV, 2018).



(d) Órgão-em-chip. Fonte: (SUN et al., 2016).

Figura 1 – Diferentes aplicações da miniaturização.

Dentre os possíveis materiais a serem empregados no microfresamento, pode-se destacar o incoel 718. Esta é uma superliga de níquel, que apresenta boas propriedades mecânicas, como resistência à corrosão, resistência à oxidação a altas temperaturas, alta resistência à fadiga e fluência. Essa combinação de propriedades faz com que sua utilização seja comum em componentes aeronáuticos, como na fabricação de peças de motores de turbina, peças de fuselagem, parafusos, fixadores, motores de foguete, componentes para extração de petróleo e gás, e energia nuclear. Apesar das boas propriedades citadas previamente, o Incoel 718 é um material de baixa usinabilidade (DAVIS; COMMITTEE, 2000; REED, 2006; GUELI et al., 2021).

Além da escolha do material, deve-se atentar às diferenças ao método macro, uma vez que o processo de microusinagem convencional possui mais desafios e restrições, comparado ao processo de macrousinagem convencional. Os problemas associados à microusinagem surgem do efeito escala, da fragilidade das ferramentas miniaturizadas, batimento da máquina, vibração da ferramenta, material da peça e do processo de forma global (BERESTOVSKIY; HUNG; LOMELI, 2014).

O microfresamento é um processo largamente utilizado para a produção de peças e dispositivos miniaturizados, que são aplicados em diferentes setores. Ao microfresar uma

peça, enfrenta-se alguns dos problemas da microusinagem, como a proximidade entre as dimensões da microestrutura da peça e a cunha de corte, que influenciam na geração de rebarbas (YADAV et al., 2017). Usualmente, após a realização de uma operação de microusinagem, ocorre a geração de grandes rebarbas comparadas às dimensões da peça, de modo que é necessário a realização de um processo extra, para obtenção de um bom acabamento ao produto final. O processo realizado para remoção das rebarbas geradas durante a microusinagem é a rebarbação. Apesar da grande aplicabilidade dos produtos, e componentes obtidos a partir dos processos de microusinagem, há poucos trabalhos na literatura sobre a rebarbação desses componentes, especialmente para as superligas de níquel.

Em frente a importância crescente da microusinagem, que enfrenta grandes desafios, especialmente em relação as rebarbas, que afetam os componentes microusinados. Este trabalho tem a finalidade de contribuir com a literatura da rebarbação de microcanaís, através da rebarbação abrasiva, para ligas de baixa usinabilidade. Neste trabalho é realizada rebarbação abrasiva de canais microfresados em duas amostras de Inconel 718, o método utilizado para a rebarbação é o polimento mecânico, visto que os microcanaís das amostras, apresentam rebarbas finas e alongadas, como pode ser observado na Figuras 2 e 3, devido as pequenas dimensões das rebarbas e sua geometria fina e alongada, foi adotado o polimento mecânico, que devido a sua baixa taxa de remoção de material e dureza dos grãos abrasivos, propicia durante a cinemática do processo, a deformação das rebarbas, de modo que elas possam ser fraturadas e removidas.

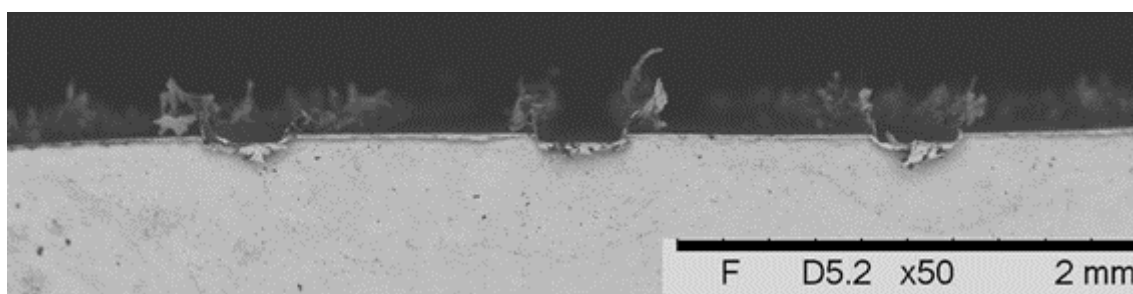


Figura 2 – Aspecto geral das rebarbas nas saídas dos canais. Fonte: (OLIVEIRA, 2019).

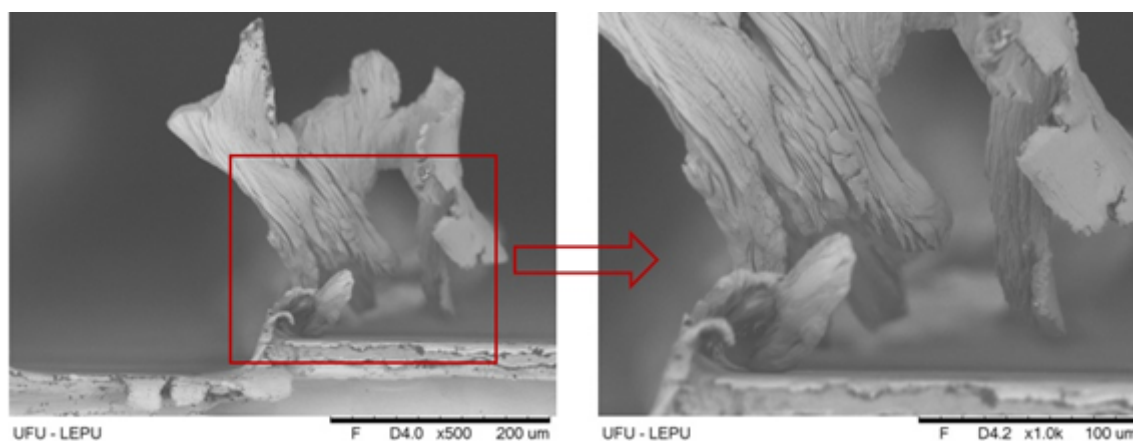


Figura 3 – Grande rebarba próxima a saída do canal. Fonte: (OLIVEIRA, 2019).

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do tempo de polimento na variação da qualidade das rebarbas, durante o processo de rebarbação dos microcanais através do polimento mecânico. Como objetivos específicos tem-se:

- Avaliar a rugosidade média (R_a) da superfície do fundo dos canais microfresados, antes e após o último intervalo de rebarbação.
- Avaliar a eficácia da rebarbação abrasiva através do polimento mecânico.
- Avaliar se ocorreu mudança na geometria da amostra após a rebarbação.
- Analisar a efetividade do método de rebarbação de forma qualitativa, através da microscopia das amostras.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Inconel 718

Com a necessidade de materiais que operassem em elevadas temperaturas, que apresentassem alta resistência à corrosão, alta resistência à fadiga e fluência, mantendo suas propriedades quando expostos a ambientes com elevadas temperaturas e propícios à corrosão, surgiram; a partir de 1950, as super ligas de níquel, que usualmente possuem quantidades significativas de, ao menos, 10 outros elementos, como Cr e Al. As superligas de níquel são utilizadas em grande escala na fabricação de componentes críticos dos motores das turbinas a gás, utilizadas como propulsores de aeronaves e na geração de energia elétrica. Na Figura 4 é apresentada uma turbina a gás, uma das aplicações possíveis, para o uso do Inconel 718, visto que os fabricantes de turbina a gás, utilizam as super ligas de níquel na fabricação de componentes internos desses dispositivos. No projeto de um motor de turbina a gás, um aspecto muito importante é a temperatura de entrada da turbina (TET), local onde os gases admitidos estão a alta temperatura. À medida que o trabalho mecânico é extraído do gás, ocorre a queda de temperatura, de modo que na saída da turbina os gases estão a uma menor temperatura (REED, 2006).

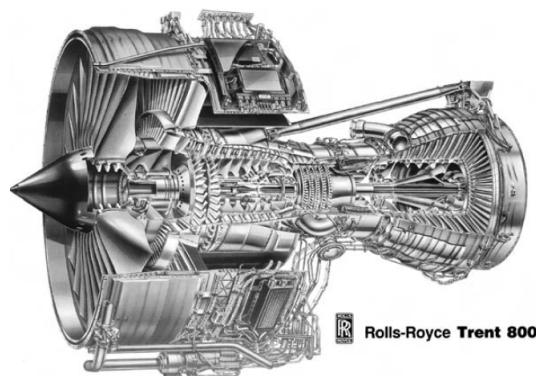


Figura 4 – Motor aeronáutico turbofan: Trent 800, utilizado no Boeing 777. Fonte: (REED, 2006).

O desempenho das turbinas aeronáuticas está relacionado ao valor da TET, de modo que para maiores valores da TET, maior é o desempenho da turbina a gás. Com o desenvolvimento dessas ligas, também conhecidas como superligas, permitiu-se o projeto

de componentes resistentes a elevadas temperaturas, e foi possível o desenvolvimento de máquinas mais eficientes (REED, 2006). De acordo com Ezugwu (2005), as peças produzidas a partir das superligas são menores e com menos material, quando comparadas com as de aço convencional. Assim sendo, quando empregadas na produção de aeronaves, as superligas proporcionam a redução de consumo de combustível e redução da poluição. Na vida útil de um motor aeronáutico, cada quilograma reduzido da sua massa total, resulta na economia de até US\$ 150.000 através da economia de combustível.

O inonel 718 é uma liga metálica à base de níquel. Devido à sua resistência a elevadas temperaturas, resistência à corrosão e altas tenacidade e encruabilidade é empregada principalmente no contexto industrial aeronáutico. Esse material tem emprego crucial para a fabricação e desenvolvimento das aeronaves graças às suas boas propriedades a altas temperaturas (RAHMAN; SEAH; TEO, 1997), de acordo com Ezugwu, Bonney e Yamane (2003) a fase de sua matriz (γ) apresenta estabilidade térmica até 900 C. As superligas de níquel, devido às propriedades previamente abordadas, são empregadas também na indústria automotiva e na fabricação de sistemas de exaustão para veículos. O inonel 718, por exemplo, é comumente utilizado pela fabricante Akrapovic (2022), que busca constante inovação no desenvolvimento dos sistemas de exaustão. Ela fornece produtos para grandes fabricantes de veículos do setor automotivo e seus produtos equipam, geralmente, carros e motos esportivas.

O níquel possui a estrutura cristalina cúbica de face centrada CFC, temperatura de fusão de 1455 °C e densidade de 8907 kg/m^3 sob condições ambientais. As composições de super ligas de níquel às vezes apresentam um número de elementos que a compõem superior a dez, o que as classifica entre os materiais mais complexos projetados pelo homem. Superligas como o Inconel 718(IN718) e Inconel 706(IN706), possuem grande proporção de ferro na sua constituição, o que as classifica como super ligas de níquel-ferro (REED, 2006).

De acordo com Reed (2006), a constituição de uma superliga de níquel se dá a partir das seguintes fases:

- A fase gama (γ) possui a estrutura cristalina CFC e geralmente forma uma fase matriz contínua, a qual outras fases podem coexistir.
- O precipitado (γ') fase precipitada que é coerente com a matriz (γ) é rica em alumínio, titânio e tântalo. A fase (γ'') é preferida em vez da (γ') para as superligas de níquel-ferro e ligas ricas em nióbio.
- Carbonetos e boretos usualmente o carbono é encontrado em concentrações de até 0,2 % em peso, combinado aos elementos reativos como titânio, tântalo e háfnio e forma carbonetos que preferencialmente residem nos contornos de grão (γ), que são ricos em cromo, molibdênio e tungstênio. Os boretos residem nos limites do grão

(γ) e sua formação ocorre pela combinação do Boro com elementos como cromo ou molibdênio.

De acordo com Davis e Committee (2000), as superligas de níquel são produzidas através da fundição em formas, forjamento e, em alguns casos, metalurgia do pó/ forjamento isotérmico. Presente nesse grupo, o inconel 718 é utilizado em componentes de turbinas a gás, tanque criogênico, molas, componentes utilizados na extração de petróleo, gás, energia nuclear e na indústria náutica, esse material resiste à corrosão a ácidos orgânicos, água do mar, álcalis e sais, suporta oxidação a altas temperaturas e apresenta alta resistência até 700 °C. Os dois tipos de tratamento térmico que usualmente são aplicados para essa liga são envelhecimento por precipitação e o recozimento. A composição do Inconel 718 é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do Inconel 718. Adaptado de (DAVIS; COMMITTEE, 2000).

Composição química		
Elemento	Mín %	Máx %
Ni	50,0	55,0
Cr	17,0	21,0
Fe	balanceável	
Co	1,0	
Mo	2,80	3,30
Nb	4,75	5,50
Ti	0,35	
Al	0,20	0,80
C	0,08	
Mn	0,35	
Si	0,35	
B	0,06	
Outro	0,3 Cu	

A título de comparação, são apresentadas as propriedades mecânicas à temperatura ambiente para o Inconel 718 e outros materiais na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas para diferentes materiais (adaptado de Davis e Committee (2000), Callister (2006), ThyssenKrupp (2022)).

Propriedade	Material			
	Inconel 718	AISI 316	Aço 1020	Alumínio
Resistência à tração (MPa)	1240	515	380	90
Limite de Escoamento (MPa)	1036	205	210	35
Módulo de Elasticidade (GPa)	211	193	207	69
Densidade (g/cm ³)	8,19	8	7,85	2,71
Ponto de Fusão (°C)	1260 a 1336	1375 a 1400	1370 a 1510	660,4
Condutividade térmica (W/m.K)	11,4	15,9	51,9	210

Apesar da alta resistência à fluência, corrosão e temperaturas elevadas, o Inconel 718 possui características que o englobam no grupo de materiais de baixa usinabilidade, devido aos seguintes fatores (EZUGWU et al., 2005):

- Tendência ao desgaste excessivo e soldagem, essencialmente, na face de saída da ferramenta.
- Formação da aresta postiça de corte em condição de baixas velocidades.
- Desgaste excessivo da ferramenta de corte devido à presença de carbonetos abrasivos duros na microestrutura da liga.
- Baixa condutividade térmica, que propicia alta temperatura de corte.

Na Figura 5 é exibida a comparação entre quatro materiais diferentes, no qual o Inconel 718 apresenta menor usinabilidade em termos de menor taxa de remoção de material, representando, assim, o material com menor usinabilidade, contrastando com o alumínio, que, dentre as opções avaliadas, possui a maior usinabilidade.

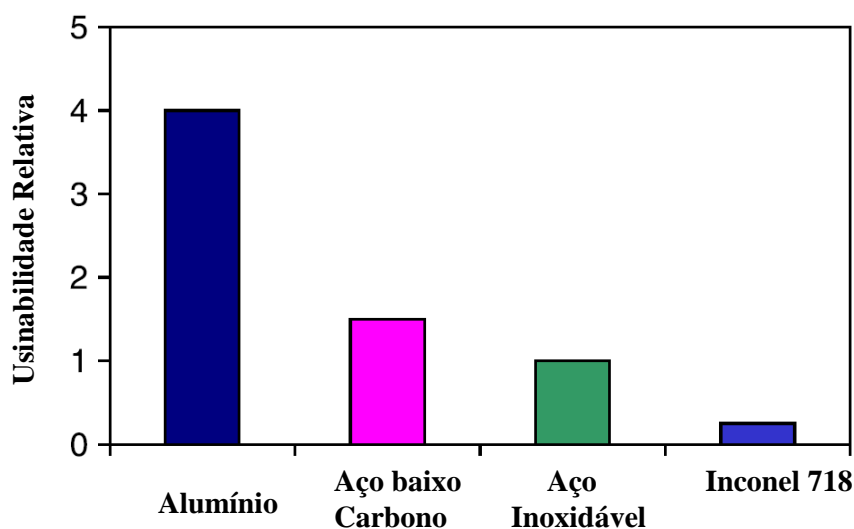


Figura 5 – Usinabilidade relativa para metais. Fonte: (EZUGWU, 2005).

2.2 Microfresamento

Em todas as escalas de produção, há busca pela economia de material, energia (eletricidade), espaço, trabalho e dinheiro, e uma das formas é através da miniaturização de produtos e dispositivos, que vão desde domésticos até tecnologias aplicadas ao setor espacial. Essa tendência evidencia o crescimento do paradigma da micro e nano manufatura, existindo diversos processos de microfabricação. Neste trabalho será dado foco

ao microfresamento, que está englobado nos processos da microusinagem (JAIN, 2015). O microfresamento possibilita a produção de componentes tridimensionais em diferentes materiais, como cerâmicas, ligas metálicas e materiais poliméricos (CÂMARA et al., 2012).

Huo e Cheng (2013) referem-se ao microcorte como a microusinagem mecânica que utiliza uma aresta de corte geometricamente definida, como os processos de micro-troneamento, microretificação, microfuração e microfresamento. Apesar da semelhança na cinemática da micro e macro usinagem, há diferenças notórias em relação à usinagem convencional, como o processo estar na escala da microestrutura do material e dificuldades na geração da superfície microusinada.

Jayanti et al. (2012) aborda que, na microusinagem, os requisitos para o acabamento superficial podem estar entre alguns micrometros até centenas de nanômetros. A obtenção da geometria e acabamento superficial na microusinagem depende de vários fatores como microestrutura do material da peça, geometria da ferramenta, máquina-ferramenta e integridade da ferramenta de corte ao longo do processo. As micro ferramentas de corte disponíveis usualmente possuem raios de aresta de corte, que variam de 1 a 5 μm . Além disso, os autores mencionam que, conforme o diâmetro da ferramenta de corte diminui, a sua rigidez também diminui, o que pode resultar na deflexão e ruptura da ferramenta de corte durante o processo de microusinagem.

Segundo Jain (2015), analisar o processo da microusinagem baseado integralmente na usinagem macro, não é uma boa escolha, pois na microusinagem a remoção e deformação do material ocorrem na escala micro/nano e não meso/macro. Desse modo, as propriedades e o comportamento dos materiais são distintos. O desenvolvimento das tecnologias na microusinagem deve vir acompanhado do desenvolvimento dessa ciência, para auxiliar na compreensão e melhorar o desempenho do processo.

Câmara et al. (2012) define o processo de microusinagem a partir das dimensões da ferramenta, que devem estar entre 1 μm e 1000 μm . Na microusinagem, a espessura de corte (h) e o tamanho do grão do material da peça a ser usinada, possuem dimensões comparáveis ao raio da aresta de corte, que não acontece na escala macro, como pode ser observado na Figura 6. Desse modo a utilização das abordagens convencionais, que descrevem os fenômenos da usinagem macro, não podem ser simplesmente aplicadas na microusinagem através de "downscaling". Segundo Huo e Cheng (2013), quando a espessura de corte possui dimensões de mesma ordem do raio da aresta da ferramenta (R_e), o ângulo de saída efetivo pode se tornar negativo ($-\gamma$), e modificar o processo de corte, como pode ser observado na Figura 6(b). Vale ressaltar que o símbolo (γ) foi utilizado para representar a microestrutura do material e é adotado para representar o ângulo de saída, seguindo a literatura, apenas neste e no próximo sub item.

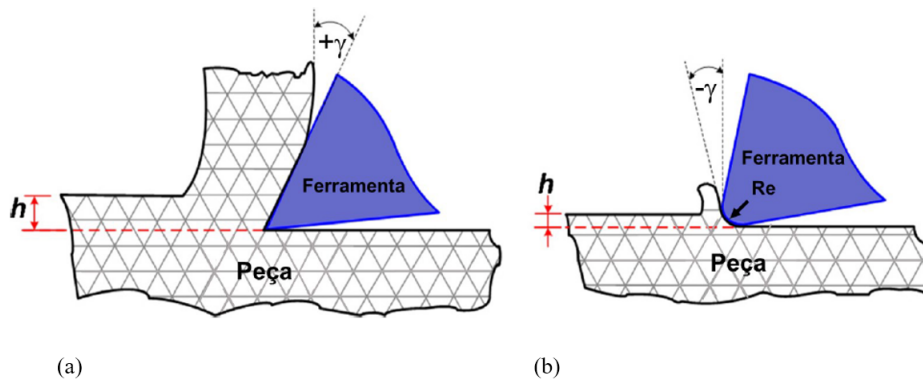


Figura 6 – Espessura de corte na (a) macrousinagem e na (b) microusinagem. Adaptado de (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

2.2.1 Efeito escala

O efeito escala, ("size effect", como usualmente é designado no inglês) é caracterizado pelo aumento não linear da energia específica de corte, isto é aumento da energia por unidade de volume de acordo com a diminuição da espessura de corte (LIU; MELKOTE, 2007), esse efeito é relacionado com fenômenos relativos à microestrutura, que ocorrem devido ao raio da ponta da ferramenta de corte estar na escala da microestrutura da peça, fato que ocorre na microusinagem (LIU et al., 2017).

Bissacco, Hansen e De Chiffre (2005) argumentam que ao comparar o fresamento convencional, escala macro, com o fresamento na escala micro, há diferença no comportamento do processo. Na escala macro, o cavaco formado engloba vários grãos, enquanto no microfresamento o cavaco é formado por poucos ou um único grão, como pode ser observado na Figura 6.

Para a usinagem convencional, que ocorre na escala macro, considera-se, que a aresta de corte é perfeitamente afiada, ou seja, não possui (R_e), como pode ser visualizado no item (a) da Figura 6, e que não ocorre contato entre a ferramenta de corte e o material da peça ao longo da superfície de folga. Desse modo, a formação do cavaco ocorre pela predominância da força mecânica de cisalhamento em razão da interação entre a ferramenta afiada e a peça (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

De acordo com Bissacco, Hansen e De Chiffre (2005), o raio mínimo da aresta de corte das ferramentas de corte varia de 1 a 4 μm , desse modo a espessura de corte (h) no microcorte é menor que o raio da aresta de corte. Assim sendo, ocorre a formação de cavaco na região do raio da aresta de corte, que resulta em ângulo de saída negativo ($-\gamma$), que pode ser observado no item (b) da Figura 6. Segundo Aramcharoen e Mativenga (2009), se a espessura de corte é compatível com o tamanho do grão, a tendência é que ocorra a fratura de único grão pela aresta de corte arredondada.

O ângulo de saída negativo ($-\gamma$), já mencionado anteriormente, é responsável pela

alteração das magnitudes das forças de cisalhamento, alta rugosidade superficial, recuperação elástica da peça e aparecimento do efeito "*ploughing*" (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006). Segundo Balogun et al. (2016), o efeito "*ploughing*" é devido a ação da ferramenta de corte "empurrando" a peça durante o processo de usinagem, ou seja, há uma deformação elástica, sem formação de cavacos, durante o avanço da ferramenta, que forma uma estrutura similar a uma crista e rebarbas na peça.

Segundo Huo e Cheng (2013), a formação dos cavacos pode não ocorrer na microusinagem, pois para a geração de cavaco ocorrer é necessário que se atinja o valor crítico, que é a espessura mínima de corte (h_m). Para melhor entendimento da espessura mínima de corte, o processo é esquematicamente exibido na Figura 7.

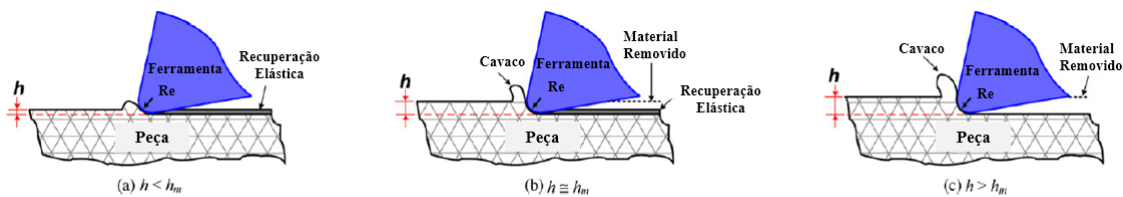


Figura 7 – Formação de cavacos em relação à espessura mínima de cavacos na usinagem em microescala. Adaptado de (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

A partir da Figura 7 (a), observa-se que para espessura de corte (h) menor que espessura mínima de corte (h_m) não há formação de cavaco, a peça apresenta deformação elástica e não há remoção de material. Na Figura 7 (b), quando a espessura de corte (h) se aproxima da espessura mínima de corte (h_m) tem-se o início da formação dos cavacos através do cisalhamento da peça e a diminuição da deformação elástica. Na Figura 7 (c), a espessura de corte é maior do que a espessura mínima de corte. Nessa etapa, a deformação elástica da peça reduz significativamente, ao passo que o cisalhamento aumenta, tem-se a formação do cavaco e o cavaco produzido apresenta dimensão próxima a totalidade da espessura de corte (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009; HUO; CHENG, 2013).

2.2.2 Rebarbas

Rebarbas podem ser definidas como projeções indesejáveis de material para além da borda da peça, devido à deformação plástica que ocorre durante a usinagem. Os componentes usinados são afetados pela presença das rebarbas. Na produção de um componente de precisão, a presença de rebarbas pode acarretar desajustes na montagem, que a depender da aplicação, pode acarretar no mau funcionamento do dispositivo ao qual é empregado. A remoção das rebarbas pode ser realizada através de métodos de rebarbação, mas essa operação eleva o custo final de produção da peça (OLVERA; BARROW, 1996). Existem diversas classificações para a geometria, posição e formação das rebarbas, as principais serão apresentadas neste item.

O surgimento de rebarbas se dá por um processo complexo de deformação do material, a descrição da formação de rebarbas é diferente para os diferentes processos de fabricação, formas e propriedades do material (KOU et al., 2015). De acordo com Gillespie (1999), a formação das rebarbas pode ser estabelecida em quatro tipos: rebarba Poisson, rebarba de entrada, rebarba de encurvamento e rebarba de estiramento.

- Rebarba Poisson: é a tendência de deformação lateral do material ao ser comprimido, até ficar plasticamente deformado. Na Figura 8 pode-se observar a representação de uma rebarba de Poisson.

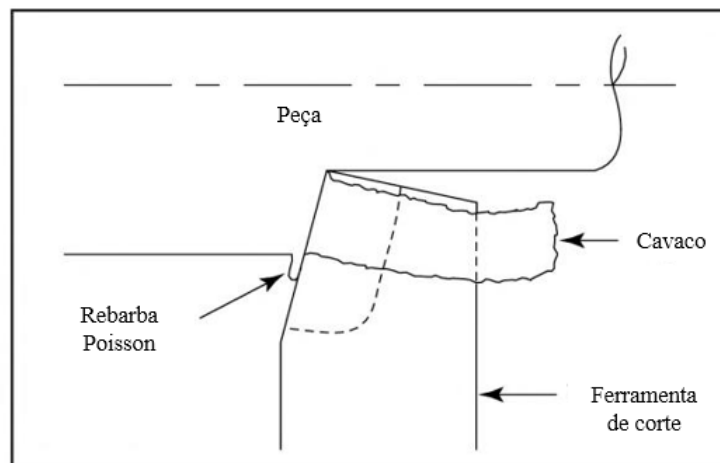


Figura 8 – Rebarba de Poisson. Adaptado de (GILLESPIE, 1999).

- Rebarba de entrada: ocorre no instante em que a aresta de corte indenta a peça. O material flui em direção oposta ao avanço da ferramenta de corte. Na Figura 9 está contida uma representação da rebarba de entrada.

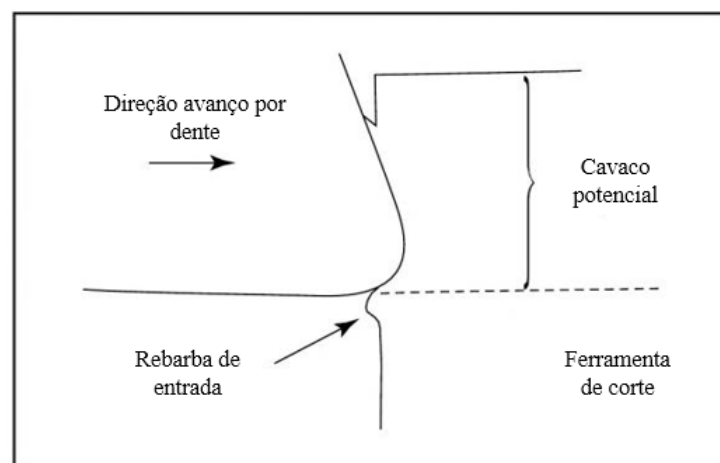


Figura 9 – Rebarba de entrada. Adaptado de (GILLESPIE, 1999).

- Rebarba de encurvamento (rollover burr): também conhecida como rebarba de saída, por outros autores, é formada no momento em que a aresta de corte sai da peça,

quando, ao invés do cavaco ser destacado, ele é dobrado, como pode ser observado na Figura 10.

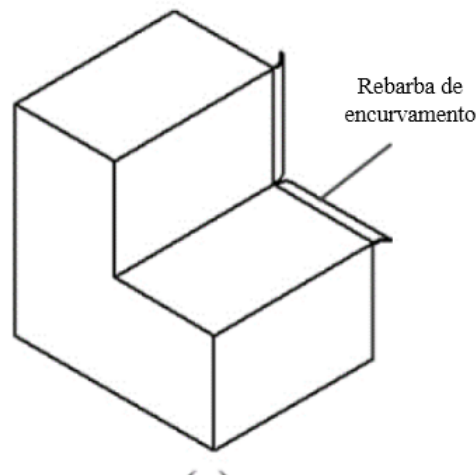


Figura 10 – Representação esquemática da rebarba de encurvamento. Adaptado de (KOU et al., 2015).

- Rebarba de estiramento (tear burr): A formação desse tipo de rebarba se dá quando o cavaco é arrancado ("rasgado") ao invés de ser cortado, o material se solta da peça ao invés de ser cisalhado. Na Figura 11 está representada a forma desse tipo de rebarba.

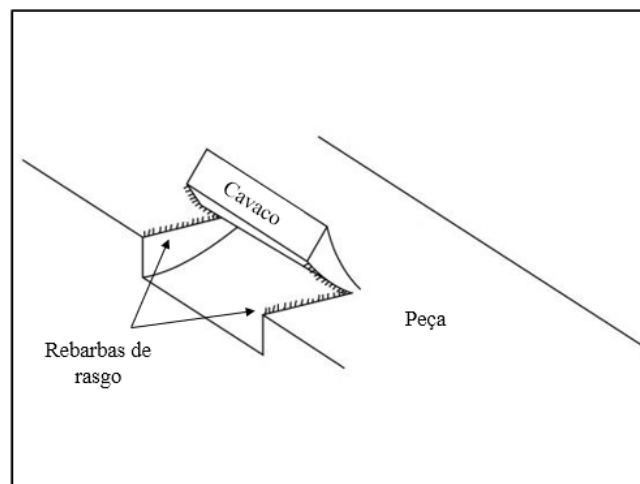


Figura 11 – Rebarbas de rasgos durante formação de cavaco. Adaptado de (GILLESPIE, 1999).

Chern et al. (2007) analisaram experimentalmente a formação de rebarbas no microfresamento da liga de alumínio Al 6061-T6, e as classificaram em quatro tipos: rebarba primária, rebarba em forma de agulha, rebarba em forma de pena e rebarba menor. A formação da rebarba primária, se dá através de estágios, que podem ser observados na Figura 12, no contato da ferramenta de corte com a peça. Quando não há produção de cavaco, tem-se atrito e desse modo, o material que se encontra à frente do caminho da

ferramenta é empurrado e deformado plasticamente, Figura 12(a). Em seguida, a região com deformação plástica acumulada é fraturada ao meio, Figura 12(b) e a rebarba primária é iniciada Figura 12(c) e, por fim, tem-se a rebarba primária com largura próxima à dimensão do diâmetro da ferramenta de corte, Figura 12(d).

Se durante o processo da formação da rebarba primária ocorre a fratura da mesma, forma-se a rebarba em forma de agulha, ou forma de pena. A rebarba menor é formada caso a profundidade de corte e o avanço sejam muito pequenos. Para melhor compreensão da forma das rebarbas geradas no microfresamento apresentado anteriormente, elas podem ser observadas na Figura 13(a) rebarba primária, Fig.13(b) rebarba em forma de agulha, Fig.13(c) rebarba em forma de pena e Fig.13(d) rebarba menor (CHERN et al., 2007).

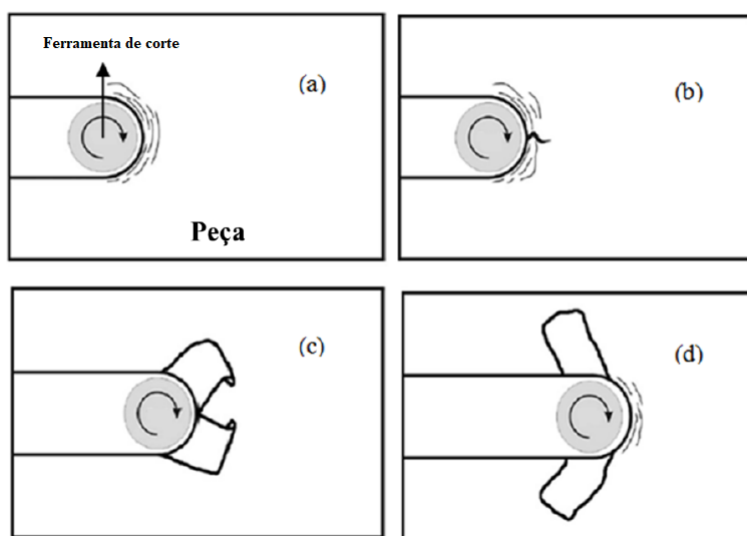


Figura 12 – Processo de formação da rebarba primária. Adaptado de (CHERN et al., 2007).

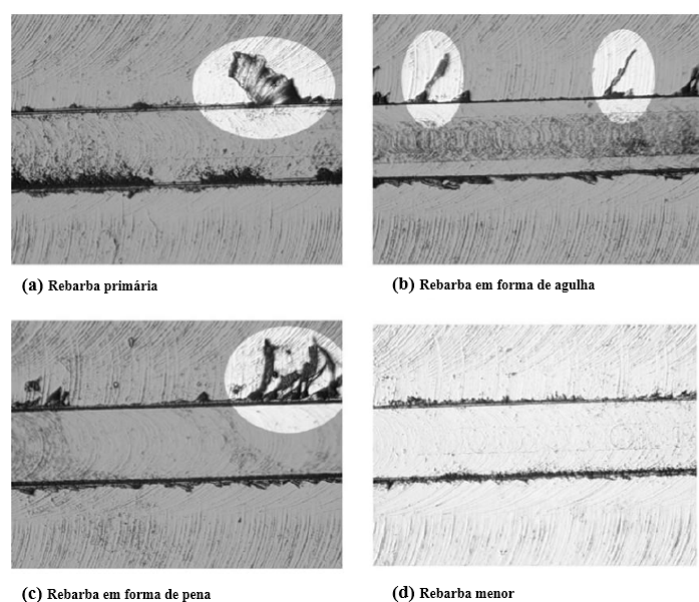


Figura 13 – Rebarbas após microfresamento, ampliação em 100x, (a) rebarba primária, (b) rebarba em forma de agulha, (c) rebarba em forma de pena e (d) rebarba menor. Adaptado de (CHERN et al., 2007).

Hashimura, Hassamontr e Dornfeld (1999) definem que, no fresamento, a produção de rebarbas depende das arestas de corte. No fresamento, a ferramenta de corte possui pelo menos duas arestas de corte, aresta principal e secundária, de acordo com o movimento da ferramenta de corte ao longo de uma trajetória sobre a peça e de acordo com a ordem de saída da aresta de corte da ferramenta, se forma um tipo de rebarba, ele as classificou de acordo com suas localizações, que são : rebarba de saída, rebarba de topo, rebarba lateral, rebarba de entrada e rebarba de entrada lateral, apesar desse método ter sido observado no fresamento, muitos pesquisadores o utilizam para analisarem a formação de rebarbas também no microfresamento. Na Figura 14, podem ser observados alguns dos tipos de rebarbas que foram observadas inicialmente no fresamento macro, mas que também aparecem no microfresamento.

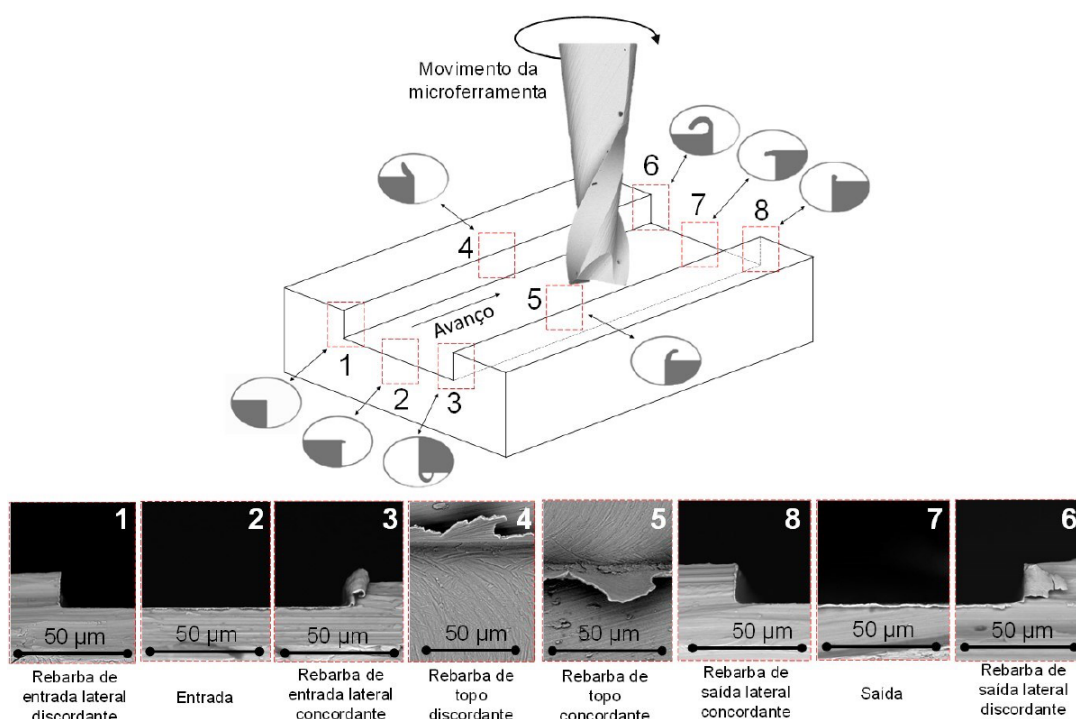


Figura 14 – Forma e localização de rebarbas obtidas após microfresamento. Fonte: (ZIBEROV, 2018).

Segundo Saptaji, Subbiah e Dhupia (2012), a formação de rebarbas no microfresamento ocorre quando a aresta de corte deixa a superfície da peça que está sendo usinada. Quando o avanço da deformação plástica chega a uma superfície livre, a resistência à deformação da superfície é pequena. Desse modo, o material é empurrado para fora, resultando na rebarba de saída, que pode ser visualizada na Figura 14. Localizada na borda superior das paredes laterais, conforme o cavaco flui e sai da superfície, ocorre a formação da rebarba de topo, que pode ser observada na Figura 14. No microfresamento de microcanais há diferença entre as rebarbas formadas nos dois lados das paredes. A parede na qual a aresta de corte entra na peça (fresamento discordante) e as rebarbas formadas nessa operação são do tipo Poisson. Na outra parede, a ferramenta finaliza o corte (fresamento concordante) e a formação de rebarba nessa operação é do cavaco sendo

arrancado "rasgado" à medida que também há uma deformação com abaulamento lateral. A diferença entre as rebarbas formadas no microfresamento concordante e discordante, podem ser observadas na Figura 14.

Lee, Stirn e Dornfeld (2002) analisaram a formação de rebarbas na microfresagem de alumínio 6061-T6, com micro fresa de topo de $127\mu\text{m}$ de diâmetro, da fabricante (RobbJack Corporation), a geometria da microferramenta pode ser observada na Figura 15. Utilizou-se a máquina ferramenta Mori Seiki CNC Drilling Center TV-30 com seu eixo convencional e com a adaptação de um fuso pneumático para usinagem. O fluido refrigerante utilizado foi emulsão solúvel em água em quantidade mínima de lubrificação (MQL).

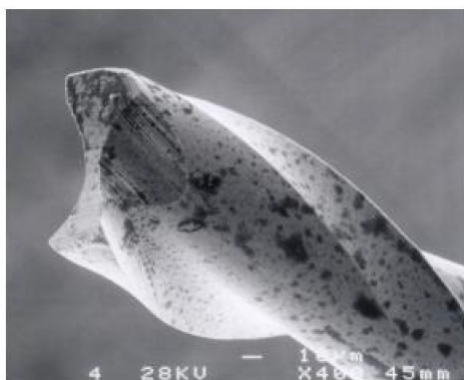


Figura 15 – micro fresa de topo com $127\mu\text{m}$ de diâmetro. Fonte:(LEE; STIRN; DORNFELD, 2002).

Os parâmetros que foram utilizados no microfresamento podem ser observados na Tabela 3. A utilização desses parâmetros, ocasionaram a geração das rebarbas que podem ser observadas na Figura 16.

Tabela 3 – Parâmetros de corte para microfresamento de alumínio 6061-T6.

Rotação (rpm)	7500 (Mori Seiki), 40000 (Fuso pneumático)
Velocidade de avanço (mm/min)	12,7; 38,1; 63,5 (Mori Seiki), 66,04; 198,12; 330.2 (Fuso pneumático)
Profundidade de corte (μm)	63,5; 127,0

As rebarbas obtidas por (LEE; STIRN; DORNFELD, 2002) podem ser observadas na Figura 16. Elas apresentam as seguintes características: a rebarba lateral de saída foi gerada, independente da frequência de rotação e avanço, e resultou na forma de "bandeira", como pode ser observado na Figura 16. Os autores usam nomenclatura própria e definem a formação da seguinte forma: a rebarba de saída na entrada da ferramenta aumenta de tamanho, de acordo com o avanço e diminui com o aumento da frequência de rotação. As rebarbas de topo de entrada são geradas através do movimento discordante, criadas quando ferramenta de corte entra na superfície superior da peça. Pode-se observar que sua forma é ondulada e a rebarba de topo de saída é gerada pelo movimento concordante,

quando a ferramenta de corte sai da superfície superior, e observa-se uma forma de "rasgo", similar à caracterizada com "tear burr" para Gillespie (1999).

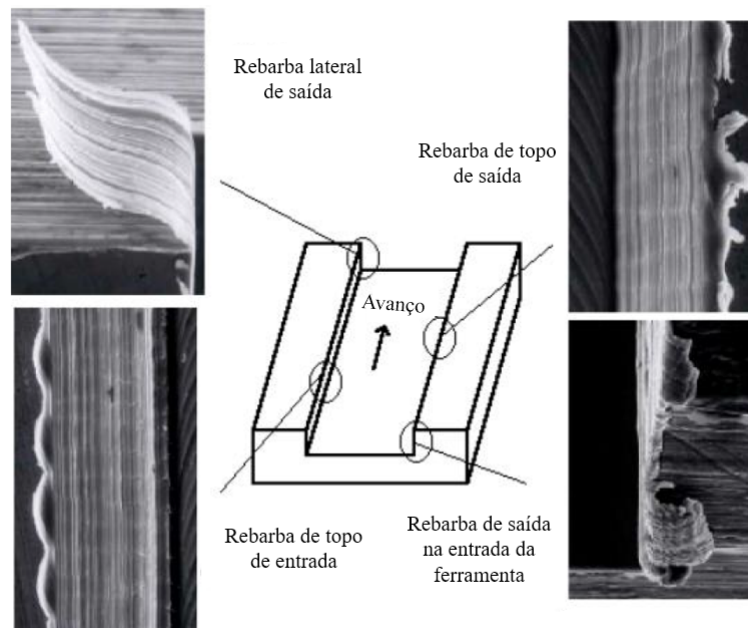


Figura 16 – Rebarbas formadas no microfresamento de topo (ferramenta gira no sentido horário). Adaptado de (LEE; STIRN; DORNFELD, 2002).

2.3 Rebarbação

A remoção de rebarbas pode ser feita através de um processo de rebarbação. Peças de precisão precisam de cuidados na sua fabricação, não só na precisão das dimensões, mas também nas operações de acabamento. A rebarbação usualmente representa até 30% do custo de produção das peças de precisão, principalmente, quando as peças apresentam pequenas dimensões. A rebarbação é um processo de remoção de material que deve manter as tolerâncias e dimensões geradas anteriormente. Desse modo, o processo de rebarbação é muito importante quando se trata de peças de alta qualidade e complexidade, e, quando se trata de peças que não necessitam de precisão, esse processo tem pouca relevância. Os processos de rebarbação podem ser classificados em cinco grupos: abrasivo, mecânico, térmico, químico e eletroquímico Gillespie (1979). Dentro dos cinco grupos citados, há vários processos possíveis de serem utilizados. De acordo com o desenvolvimento de novas tecnologias para rebarbação, podem surgir novos métodos e/ou melhoras dos que já existem.

Um dos métodos de rebarbação comumente utilizado é o manual, pois não necessita de tecnologia avançada para sua execução, e as ferramentas necessárias são de baixo custo (GILLESPIE, 1999). Apesar da grande precisão dos processos de rebarbação, algumas vezes pode ocorrer que o perfil da borda da peça seja alterado, o que é indesejável para manutenção da precisão. Para tentar evitar esses erros pode-se realizar a fabricação de peças superdimensionadas, que permitam maior remoção de material, até atingir as

dimensões finais da peça, ou se utilizar de dois ou mais processos de rebarbação (GILLESPIE, 1979). Dentre os métodos possíveis de rebarbação será dado foco ao método abrasivo.

2.3.1 Métodos abrasivos

Segundo Liao, Xi e Liu (2008), o processo de polimento, utiliza abrasivos para suavizar a superfície da peça sem modificar sua geometria, e a rebarbação consegue remover arestas vistas e rebarbas de uma peça. O polimento é um processo menos agressivo em relação à remoção de material, o que o torna um processo interessante de ser estudado para rebarbação na escala micro, pois, nessa escala, é necessária alta precisão durante a remoção das microrebarbas, para que não haja alteração indesejada na borda da peça microusinada.

De acordo com Ben Achour et al. (2020), o micropolimento baseia-se no "down-scaling" do polimento mecânico convencional, para realização do processo na escala micro, utiliza-se microferramentas compatíveis. Esse processo caracteriza-se por uma área de contato reduzida, que permite o controle da remoção local de material com alta precisão.

Segundo Marinescu et al. (2004), processos abrasivos permitem a produção de peças que apresentem elevada precisão e pequenas tolerâncias. Nos processos abrasivos há o emprego de partículas granulares duras, que permitem modificar a forma e textura da superfície da peça, os abrasivos podem ser colados, fixos na ferramenta abrasiva ou utilizados como partículas abrasivas soltas, que comumente são suspensas em líquido ou cera. A remoção de material através da abrasão ocorre pelo desprendimento de material de superfícies em movimento relativo, provocado por saliências e/ou partículas duras entre as superfícies opostas, ou por partículas que se fixam em uma das superfícies.

Dentre os processos abrasivos que utilizam abrasivos soltos, dois processos de destaque são a lapidação e o polimento. Na lapidação o abrasivo solto é inserido entre uma placa denominada "lap", comumente fabricada em ferro fundido, e a superfície da peça, como pode ser observado na Figura 17. Usualmente suspende-se o abrasivo em um meio líquido, como óleo, que propicia a lubrificação e auxilia no transporte do abrasivo. A placa que fica em contato com o abrasivo durante o processo de lapidação está sujeita a desgaste, assim como o abrasivo.

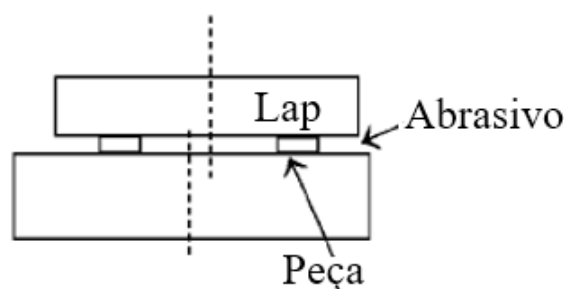


Figura 17 – Princípio básico da lapidação. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).

Similar à lapidação, no polimento é utilizado abrasivo solto, mas em vez de utilizar uma placa para exercer pressão sobre o abrasivo, utiliza-se uma superfície denominada de almofada de polimento, ou pano macio, como pode ser observado na Figura 18. A utilização da almofada permite aos abrasivos seguir os contornos da superfície da peça. A ação de abrasão do polimento é suave, gera pequenos riscos, limitados à penetração dos grãos na peça e apresenta baixa taxa de remoção de material. Usualmente, é utilizado quando a geometria da peça já está muito próxima da geometria final, de modo que o principal objetivo do polimento é modificar a textura superficial da peça, que permite obter uma superfície espelhada e reflexiva sem interferir em sua geometria (MARINESCU et al., 2004), o que torna este processo ideal para aplicação em rebarbação de peças microusinadas.

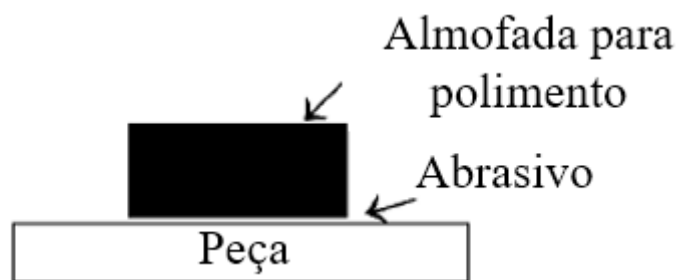


Figura 18 – Princípio básico do polimento. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).

Segundo Marinescu et al. (2004), os abrasivos podem ter origem natural, ou sintética, pela qual são produzidas formas cristalinas artificiais, que podem ser divididas em dois grupos: abrasivos fundidos, que são obtidos após sofrer altas temperaturas em um forno elétrico, que propicia a formação de cristais mais duros, e os abrasivos não fundidos, que são resultado de baixas temperaturas e aditivos químicos. Os abrasivos mais utilizados no segmento industrial são:

- **Diamante:** Abrasivo que pode ser encontrado nas formas sintética ou natural, e é o abrasivo mais duro e afiado, com a maior dureza na escala Mohs, que equivale ao número 10, como pode ser observado na Tabela 4. Esse abrasivo é recomendado para o carboneto de tungstênio (metal duro) e outros materiais de alta dureza. A utilização desse abrasivo resulta em acabamento fino e corte rápido.
- **Nitreto cúbico de Boro (CBN):** Abrasivo que pode ser encontrado na forma sintética com dureza próxima à do diamante, 9,9 na escala Mohs, como pode ser observado na Tabela 4. Esse abrasivo é proposto para lapidação de metais ferrosos, principalmente para aço SAE 52100 utilizado na fabricação de rolamentos, superligas, ferro fundido e materiais cerâmicos em alguns casos.
- **Carbeto de Silício (SiC):** Abrasivo cristalino fundido, dureza de 9,5 na escala Mohs, que pode ser observada na Tabela 4. Quando utilizado na lapidação de materiais de alta ou baixa resistência à tração, proporciona um corte rápido com boa

quebra de cristais o que mantém sua capacidade abrasiva. É recomendado para operações de lapidação, como engrenagens forjadas ou endurecidas, válvulas, e trabalhos onde o polimento não é essencial.

- **Óxido de Alumínio (Al_2O_3):** Abrasivo fundido, com estrutura cristalina dura e difícil de fraturar, recomendado para lapidação de materiais de alta resistência à tração e processos de lapidação de desbaste, engrenagens endurecidas, canais para rolamento de esferas, e operações de lapidação, onde a pressão pode ser aplicada para quebrar os cristais. A dureza desse abrasivo pode ser observada na Tabela 4.
- **Corundum:** Abrasivo encontrado na natureza, possui estrutura cristalina mais macia que o SiC ou Al_2O_3 fundido. Esse abrasivo é recomendado para operações de lapidação de metais com dureza Rockwell C média de (35-45 HRC). A dureza associada a esse tipo de abrasivo pode ser observada na Tabela 4.
- **Alumina não fundida (calcinação com hidrato):** é um abrasivo comumente utilizado no processo de polimento de metais com dureza de (45-63 HRC), usualmente o acabamento final da peça trabalhada com esse abrasivo é suave. A alumina calcinada é produzida através de tratamento térmico e o grau de calcinação determina as características do produto. Usualmente, é empregado os termos, macio, médio e duro para se referir ao abrasivo resultante dos graus de calcinação leve, médio e alto. Quanto à forma da estrutura cristalina, é composta por cristais planos em forma de "chapa", cuja a espessura é de aproximadamente um sexto do diâmetro. Devido à sua forma, as partículas tendem a raspar a superfície em vez da ação de goivagem e rolagem. Desse modo, a propensão a produzir arranhões profundos na peça é menor. As durezas típicas para esse tipo de abrasivo podem ser observadas na Tabela 4.

Ao analisar a Tabela 4 é importante entender que, apesar de a dureza para dois abrasivos diferentes ser próxima, ou igual em Mohs, não quer dizer que os dois abrasivos, produzam o mesmo acabamento e tipo de corte, pois características como a formas cristalinas, e composição química, são responsáveis pelas diferentes características de acabamento produzidas por esses abrasivos.

Tabela 4 – Dureza de alguns materiais abrasivos. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).

Abrasivo	Dureza (Escala de Mohs)
Diamante	10,0
Nitreto cúbico de Boro (CBN)	9,9
Carbeto de Silício	9,5
Oxido de Alumínio	9,0
Corundum	9,0
Óxido de Cromo	8,5
Quartzo	7
Alumina Calcinada	5 a 7

Marinescu et al. (2004) investigaram a influência do tamanho do grão abrasivo na taxa de remoção de material (MRR, do inglês Material Removal Rate) ao longo do tempo no processo de lapidação. Foi utilizada uma pasta para suspensão dos abrasivos, na vazão de 1,5 ml/min, com concentração de 1,4g/500ml, e imposta uma rotação de 56 rpm na placa de lapidação (lap). Na Figura 19, pode ser observado que, para um tamanho de grão menor Figura 19(a) a taxa de remoção de material é menor, comparada à utilização de um grão abrasivo maior Figura 19(b). Quanto à rugosidade média (Ra), pode ser observado, na Figura 20(a), que o abrasivo com tamanho de grão menor apresentou menor rugosidade média que o abrasivo de grão maior, que pode ser observado na Figura 20(b).

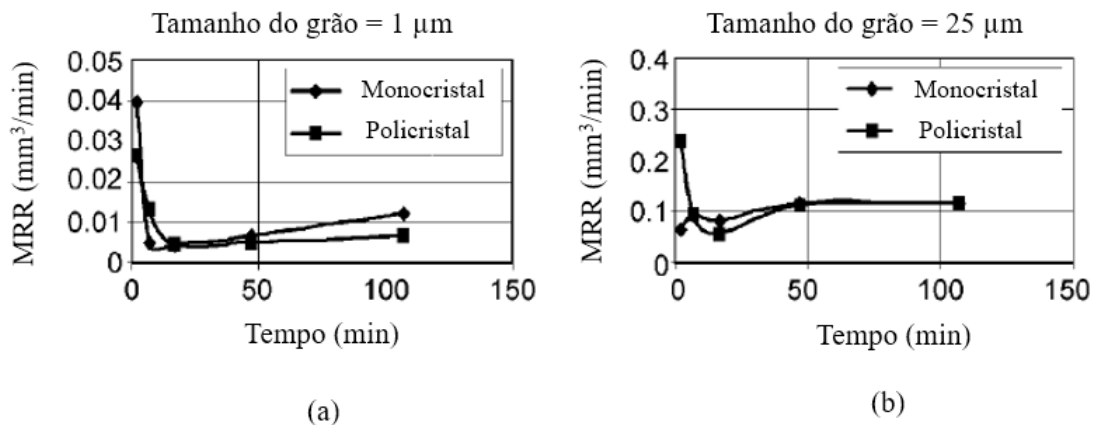


Figura 19 – Remoção de material vs tempo, para abrasivo de diamante com grão de (a) $1\mu m$ e (b) $25\mu m$. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).

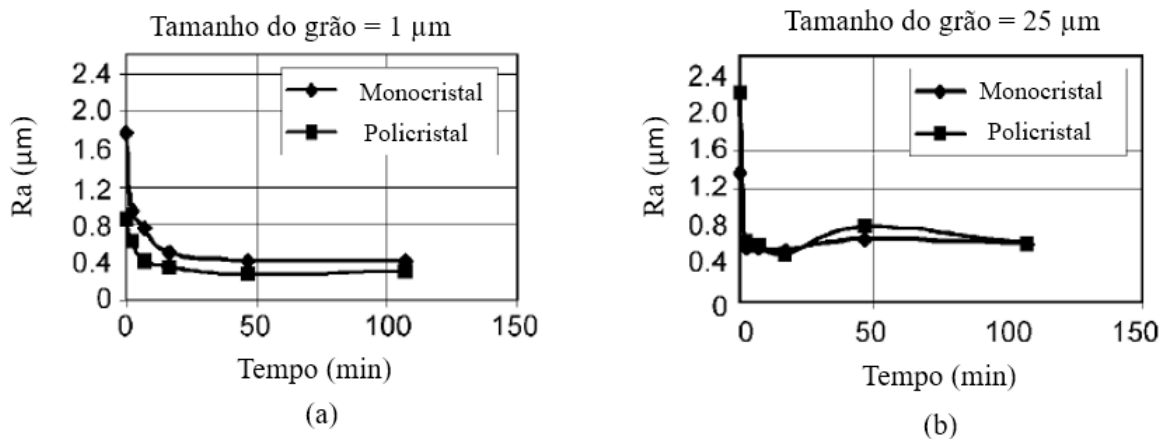


Figura 20 – Rugosidade média vs tempo, para abrasivo de diamante com grão de (a) $1\mu m$ e (b) $25\mu m$. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).

Vale ressaltar que a lapidação possui semelhanças e diferenças em relação ao polimento. De forma mais específica, o polimento é um dos processos mais antigos utilizados para suavizar superfícies, remover arranhões e outros defeitos. Seu objetivo é diminuir a rugosidade da superfície. Nesse processo, os grãos abrasivos ficam soltos ou temporariamente embutidos em um disco de polimento, que é macio, ou seja, não possui resistência

mecânica e se deforma facilmente. A profundidade de penetração do grão na peça causa deformação elástica e plástica, de acordo com o aumento da profundidade da penetração do grão, ocorrem microfissuras, que acarreta no desprendimento de material da peça produzindo micro cavacos. Durante o processo é utilizado um líquido para suspender o abrasivo, cuja função é uniformizar a distribuição de grãos abrasivos durante o processo. O mecanismo básico do processo de polimento, pode ser observado na Figura 21 (MARINESCU et al., 2004).

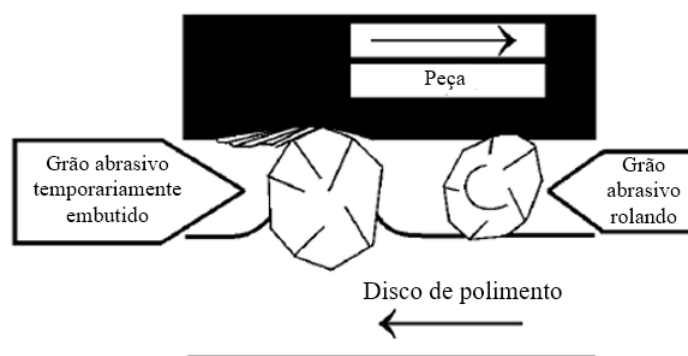


Figura 21 – Princípio básico do polimento. Adaptado de (MARINESCU et al., 2004).

2.3.2 Rebarbação na microusinagem

As rebarbas na microusinagem são difíceis de serem removidas após a realização do processo. Desse modo, os pesquisadores estudam alternativas que minimizem a geração de rebarbas durante a microusinagem. O processo de rebarbação convencional não pode ser facilmente aplicado quando se trata da remoção de micro-rebarbas, devido às dimensões das peças e à possibilidade de gerar defeitos durante a rebarbação (LEE; STIRN; DORNFELD, 2002).

Mathai, Melkote e Rosen (2013) estudaram a remoção de rebarbas produzidas pelo processo de microfresamento de microcanais, com $500\mu\text{m}$ de largura e 6 mm de comprimento, em uma placa de NiTi(55% Ni, 45% Ti, Johnson-Matthey Medical Components) com $25\mu\text{m}$ de espessura. Para rebarbação utilizaram escovas radiais de nylon impregnadas com abrasivo. O esquema representativo desse processo de rebarbação pode ser observado na Figura 22. A escova de nylon impregnada de abrasivos, gira ao mesmo tempo que a peça é movimentada de forma alternada em relação a escova com velocidade de 120 mm/s, como pode ser observado na Figura 22(a). A escova utilizada pelos autores foi de 19 mm, escova de nylon Scotch-Brite Mini Brush, da fabricante 3M corporation, impregnadas com óxido de alumínio cerâmico, com grãos FEPA 120 ($109\mu\text{m}$). A escova possui 30 cerdas curvas que afunilam de 0,5 mm no cubo para 0,45 mm na ponta e a disposição das cerdas no cubo é de forma escalonada, como pode ser observado na Figura 22(b). O posicionamento da escova foi feito de forma que as cerdas entrem em contato com as rebarbas presentes nas bordas do canal microfresado, como pode ser observado na Figura 22(c). A

penetração da escova Δ_n é definida como a distância que a escova é movimentada normal à superfície da peça, após entrar em contato com a peça, como pode ser observado na Figura 22(d). Os parâmetros aplicados no processo, foram 0,5 mm e 1 mm como os valores de penetração (Δ_n) e velocidade de rotação da escova controlada de 5000 rpm (2,36 m/s na ponta da cerda) a 15000 rpm (7,02 m/s na ponta da cerda). A máquina ferramenta na qual foi fixada a escova para rebarbação foi a Dremel 4000, que pode ser observada na Figura 23(a).

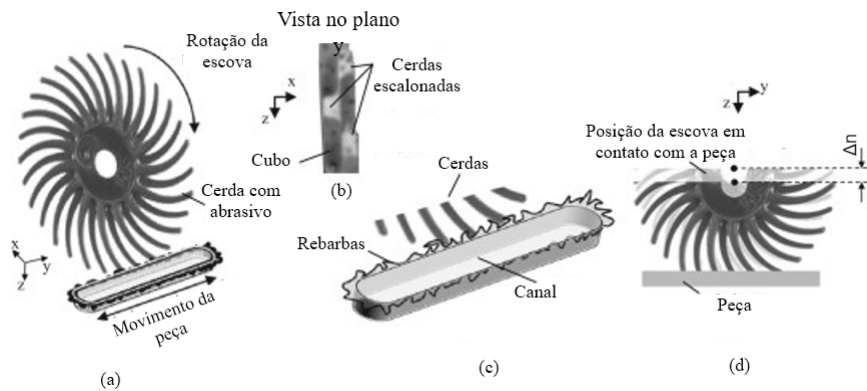


Figura 22 – Esquema do processo de rebarbação: (a) elementos do sistema, (b) vista detalhada do cubo, (c) vista detalhada das rebarbas e (d) penetração da escova. Adaptado de (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).

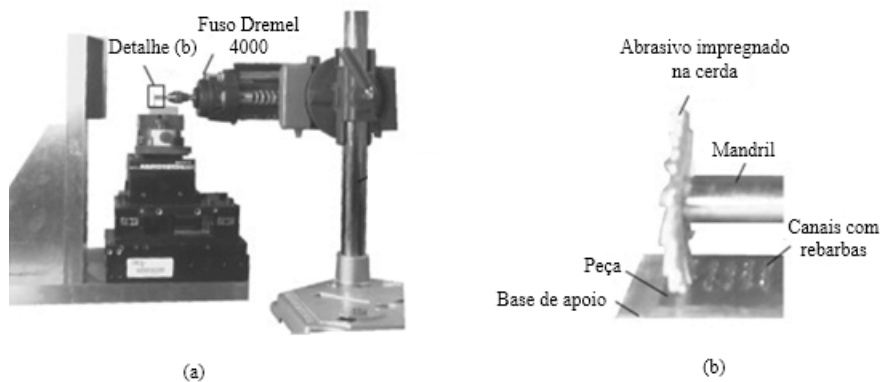


Figura 23 – Configuração experimental: (a) Configuração para rebarbação, (b) vista detalhada da escova posicionada para rebarbação. Adaptado de (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).

A rebarbas presentes na peça, antes do processo de rebarbação podem ser observadas na Figura 24 (a). A rebarbação do microcanal foi realizada em duas fases (FASE I e II): na primeira fase ocorre a quebra das rebarbas, restando uma raiz de rebarba, que na segunda fase é achatada plasticamente ou desgastada. Foi utilizada a rotação de 15000 rpm e 1 mm de penetração como parâmetros iniciais, o que proporcionou a remoção da maior parte das rebarbas longas, tanto para as rebarbas geradas pelo fresamento concordante quanto para o discordante no microcanal, como pode ser observado na Figura 24(b). Pequenas marcas de escovação podem ser vistas na superfície da peça, exceto na borda, pois as rebarbas protegem a superfície da peça contra a ação das escovas, como pode ser

observado na Figura 24(c). Além disso, as rebarbas residuais são achatadas na superfície da peça pela ação das cerdas, que sugere ser pelo fato das rebarbas longas se soltarem da borda do microcanal, como pode ser observado na Figura 25. De forma simultânea, as rebarbas curtas tendem a serem achatadas em vez de fraturadas.

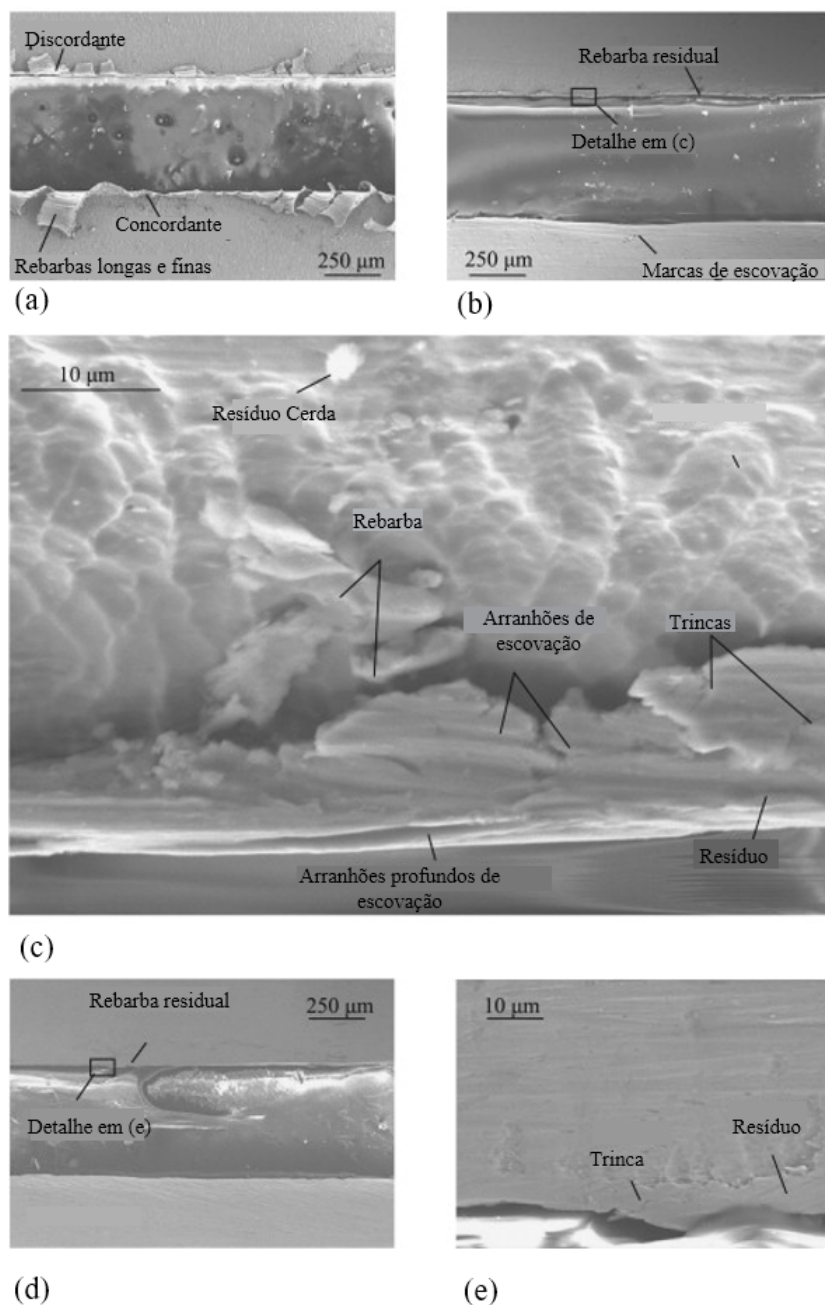


Figura 24 – Microcanal antes e após a rebarbação, (a) antes da rebarbação, (b) após duas passagens (FASE I), (c) vista detalhada da borda após duas passagens, (d) após mais duas passagens (FASE II) e (e) vista detalhada da borda após mais duas passagens. Adaptado de (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).

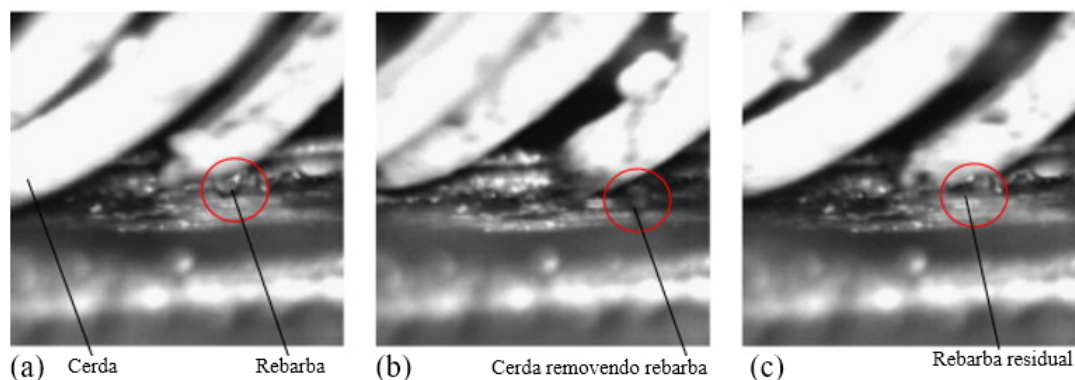


Figura 25 – Mecanismo de remoção de rebarba: (a) antes da passagem da rebarba, (b) remoção da rebarba pela cerda da escova, (c) rebarba residual. Adaptado de (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).

Na Figura 24(c), pode ser observada em detalhe uma região da superfície da peça exibida na Figura 24(b), na região detalha observa-se a presença de resíduos da escova e da rebarba, que podem ser diferenciados pelo brilho, segundo os autores. Trincas originadas na borda da rebarba aparecem junto às marcas de escovação. Os autores sugerem que, para as rebarbas residuais, arranhões são causados pela ação dos abrasivos, que ocasionam trincas nas bordas da peça e se propagam sobre carregamento cíclico das cerdas, até cruzarem com a borda da rebarba, ou com outra trinca, que propicia o destacamento de um pedaço da rebarba, gerando os resíduos de rebarba (MATHAI; MELKOTE; ROSEN, 2013).

O processo de rebarbação ocorre até que toda a rebarba seja removida, que pode ser observado na Figura 24(d,e). Rebarbas e algumas microtrincas podem ser observadas após a FASE II, para a condição de escovação mais suave, 5000 rpm e penetração de 0,5 mm, na qual foi observada a permanência de algumas rebarbas residuais. Para velocidade de rotação e penetração de 15000 rpm e 1 mm, respectivamente, não há presença de rebarbas residuais. As rebarbas foram removidas do microcanal em 12 min, alterando a espessura da peça em aproximadamente um micron. Através da análise qualitativa, percebe-se que o método da escovação com a utilização de abrasivos para microrebarbação pode ser uma boa solução a ser adotada.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo é apresentado os materiais e métodos empregados para a realização dos estudos de rebarbação. Vale ressaltar que as amostras de Inconel 718, que foram submetidas a rebarbação através do processo de polimento, a fim de investigar a influência do tempo de polimento na rebarbação, foram obtidas por Oliveira (2019).

3.1 Caracterização do material

Foram produzidas amostras de Inconel 718 na forma envelhecida, a partir do processo de fresamento. As dimensões escolhidas para a amostra foram: 15 mm de largura, 15 mm de altura e 20 mm de comprimento, como pode ser observado na Figura 26.

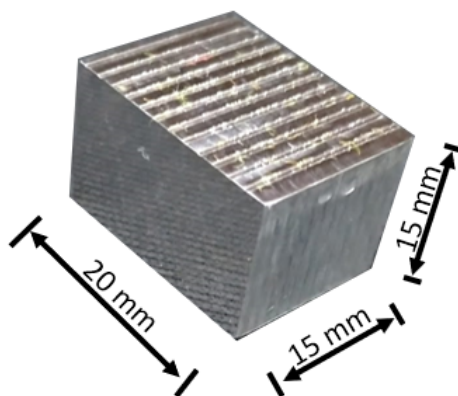


Figura 26 – Dimensões e geometria das amostras de Inconel 718.

A composição química das amostras de Inconel 718 é baseada na composição obtida por Reed (2006), que pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química teórica do Inconel 718 conforme (REED, 2006).

Elemento	% em peso Reed
Carbono	0,04
Alumínio	0,50
Titânio	0,90
Cromo	19,00
Ferro	18,50
Níquel	50,66
Nióbio	5,10
Molibdênio	5,30

3.2 Microfresamento das Amostras

Foram produzidos microcanais em cada uma das amostras, por meio de microfresamento, com uma microfresadora CNC de três eixos, modelo Mini-mill/GX, da fabricante Minitech Machinery Corporation®. A máquina ferramenta possui resolução de posicionamento de $0,1 \mu\text{m}$, velocidade de avanço de 1000 mm/min , equipada com um motor elétrico Nakanishi EM-3060, que conta com ajuste de rotação máxima de 60000 rpm . O controle do processo foi realizado com o software Mach3Mill (Minitech Machinery Corporation®, 2022; NAKANISHI, 2022).

As ferramentas de corte adotadas, modelo MS2MSD0040 da fabricante MITSUBISHI, possuem as seguintes características: diâmetro de $0,4 \text{ mm}$, com erro máximo de 5% de redução, comprimento de corte de $0,8 \text{ mm}$ e duas arestas de corte com raio de $1,1 \pm 0,1 \mu\text{m}$. A composição da microfresa é de metal duro com revestimento de (Al, Ti)N (Mitsubishi, 2022). As dimensões da ferramenta, em milímetros e graus, podem ser observadas na Figura 27.

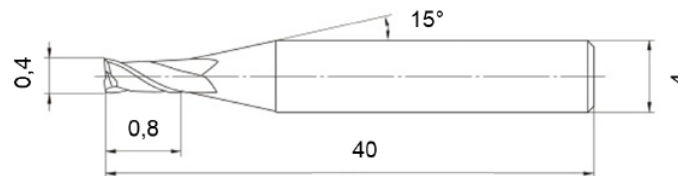


Figura 27 – Microferramenta MS2MSD0040. Adaptado de (Mitsubishi, 2022).

Para a produção dos microcanais foi utilizado o fluido de corte integral Coolube 2210EP do fabricante UNIST (UNIST, 2022), e os parâmetros de corte que são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de corte utilizados (OLIVEIRA, 2019).

Ensaio	Rotação n (rpm)	Velocidade de corte Vc (m/min)	Avanço por dente fz (μm)	Profundidade de corte ap (μm)	Penetração de trabalho ae (μm)
1	40000	50,3	5,0	40	400
2					

Foram produzidos 12 canais em cada amostra, com espaçamento entre centros de 1,5 mm (distância entre centro dos canais), comprimento de 15 mm e profundidade de corte de 40 μm , como pode ser observado na Figura 28.

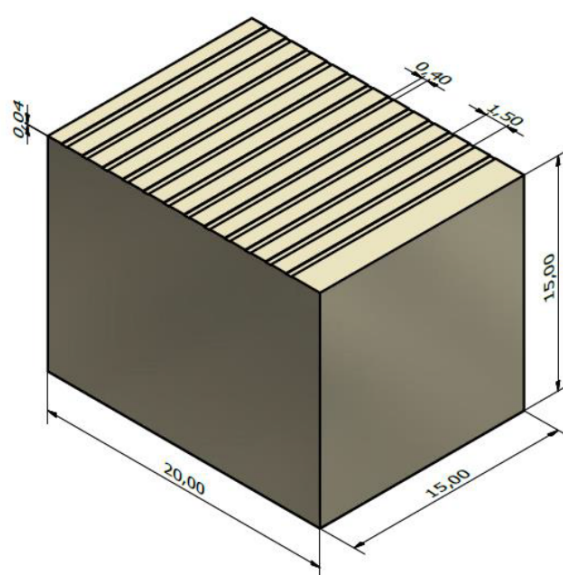


Figura 28 – Esquema dimensões e forma dos microcanais das amostras de Inconel 718. Adaptado de (OLIVEIRA, 2019).

Os ensaios apresentados na Tabela 6, foram realizados para uma amostra e uma réplica, com a utilização de uma microfresa nova para cada amostra. Todas as microfresas utilizadas foram inspecionadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), para garantir que não apresentavam nenhum dano antes do início do processo.

3.3 Rebarbação das amostras

O método abrasivo é um processo que abrange uma grande variedade de materiais, graças aos diferentes processos e tecnologias que fazem parte desse processo, as quais possibilitam a usinagem de peças nas escalas micro e macro. Neste trabalho, foi utilizado o método de polimento mecânico, que apesar de não muito presente na literatura para aplicação na escala micro, mostra-se um processo de rebarbação promissor para essa aplicação, pois sua taxa de remoção de material é baixa, e não altera a geometria da

peça. O abrasivo escolhido foi a pasta de diamante para polimento metalográfico da fabricante TECLAGO, com granulometria média de $3,0 \mu m$.

O pano de polimento utilizado, foi o pano para polimento metalográfico também da fabricante TECLAGO, junto com pasta de diamante com granulometria de $3 \mu m$ à $6 \mu m$. O diâmetro do pano é de 200 mm .

O processo foi determinado como manual, sem auxílio de equipamentos rotativos, desse modo foi definido da seguinte forma: foram traçados cinco pontos no pano de polimento (I, II, III, IV e V), e definido uma trajetória que passa por esses cinco pontos, como pode ser observado na Figura 29. O percurso completo foi quando amostra percorreu todos os pontos da seguinte forma (V-I, I-II, II-V, V-III, III-IV e finaliza saindo do ponto IV até V). O percurso completo percorrido pela amostra, foi medido com o auxílio de um paquímetro, e considerado como 60 cm , ou seja, uma vez realizado o trajeto completo foi percorrido 60 cm . O percurso era realizado 8 vezes por completo em um intervalo de 30 s , que resultou em um comprimento total de 480 cm , ou seja, a cada 30 s de rebarbação com o polimento mecânico foi percorrido 480 cm . Os intervalos de tempo maiores, foram alcançados a partir da realização do processo várias vezes a partir dos intervalos de 30 s . Para ser mais preciso foi adotado o trajeto percorrido e não somente o tempo, como critério de parada. Além disso, a cada 480 cm a amostra foi rotacionada em 180° , a fim de evitar remoção de material concentrada em apenas uma região da amostra.

Para padronizar a força exercida sobre a amostra, foi utilizado um peso sobre a amostra, como pode ser observado esquematicamente na Figura 30, de modo que, o movimento com a mão foi apenas para guiar a amostra durante a rebarbação. O peso utilizado foi um corpo de prova de Inconel 718 de 40 g , com dimensões $14,3 \times 24 \times 14,35 \text{ mm}$.

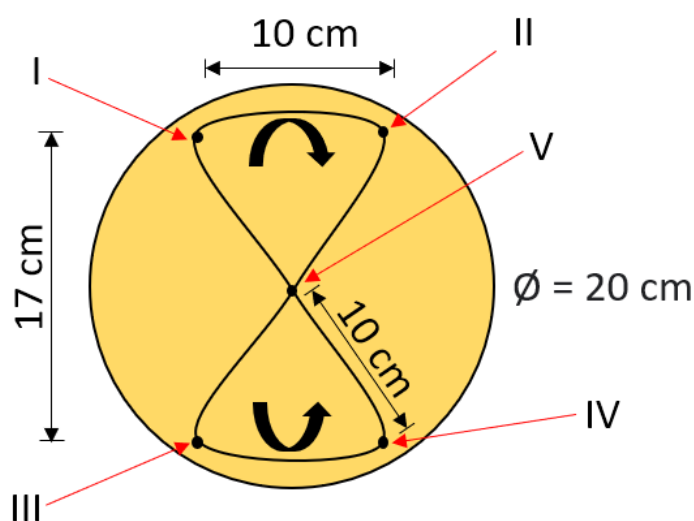


Figura 29 – Esquema do percurso de rebarbação e medidas do percurso.



Figura 30 – Esquema do processo de polimento manual.

A realização do processo de rebarbação abrasiva através do polimento mecânico, ocorreu da seguinte forma, inicialmente foi molhado o pano de polimento com água, retirado o excesso de água e colocado sobre uma mesa plana, depositado uma pequena quantidade de pasta de diamante e espalhada sobre a trajetória do pano de polimento. Para o espalhamento da pasta, foi utilizado uma das faces do peso utilizado sobre a amostra. Após o espalhamento, foi iniciado o processo de rebarbação com a amostra, garantindo que nenhum material diferente de Inconel 718 tivesse contato com o pano, para evitar contaminação. Ao iniciar o processo é cronometrado o tempo, e pausado quando é percorrida a distância de 480 cm, com o tempo médio de 30 s, para realizar os intervalos de tempo maiores, foi realizada a parada a cada percurso completo de 480 cm, equivalente a 30 s, e iniciado o processo novamente, rotacionando a amostra em 180° a cada percurso completo no intervalo de 30 s, como abordado previamente. Os tempos utilizados para rebarbação foram: 1 min, 2 min e 4 min.

3.4 Variáveis de saída

Esta etapa consiste na análise das seguintes variáveis de saída: rugosidade da superfície do fundo do canal, altura das rebarbas, topografia da amostra e investigação de um tempo ótimo de polimento. As variáveis foram levantadas através da microscopia da amostra, antes e após o processo de rebarbação, para cada tempo. Para realização da microscopia foi utilizado o microscópio confocal a laser Olympus Lext OLS4100, como pode ser observado na Figura 31, disponível no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Confocal Laser da Universidade de Brasília. As variáveis de saída foram obtidas baseadas no estudo de rebarbação desenvolvido por Silva (2021), que similarmente a este trabalho, investigou a rebarbação de microcanais de Inconel 718, a partir da rebarbação abrasiva utilizando lixas.



Figura 31 – Microscópio utilizado no experimento com amostra posicionada, para levantamento das variáveis de saída.

3.4.1 Medição da rugosidade

Para medição da rugosidade, foram escolhidas três diferentes regiões de cada canal microfresado, e realizada a medição nesses pontos, foi obtida a média e considerado o erro, como duas vezes o desvio padrão. No processo de medição da rugosidade do fundo do canal, foi utilizada a lente do microscópio com aumento de $10\times$ para enquadrar o canal. Após iniciar o processo, as lentes se alternam, e o processo finaliza na lente com aumento de $50\times$. As três regiões escolhidas foram no início, meio e fim do canal, e evitada a região das extremidades do microcanal, a fim de evitar as irregularidades contidas nessas localizações, que afetam as medições diretamente. Para cada região foi realizada a medição na parte central, em relação à largura, do canal. Foram adotados, o parâmetro Ra , filtro de Gauss com cut-off $\lambda_c = 800 \mu m$ e comprimento de amostragem $n = 5$, de acordo com a ABNT NBR ISO 4288. Na Figura 32 pode ser observado o sentido de medição da rugosidade, e sentido de avanço da fresa ao longo dos canais microfresados.

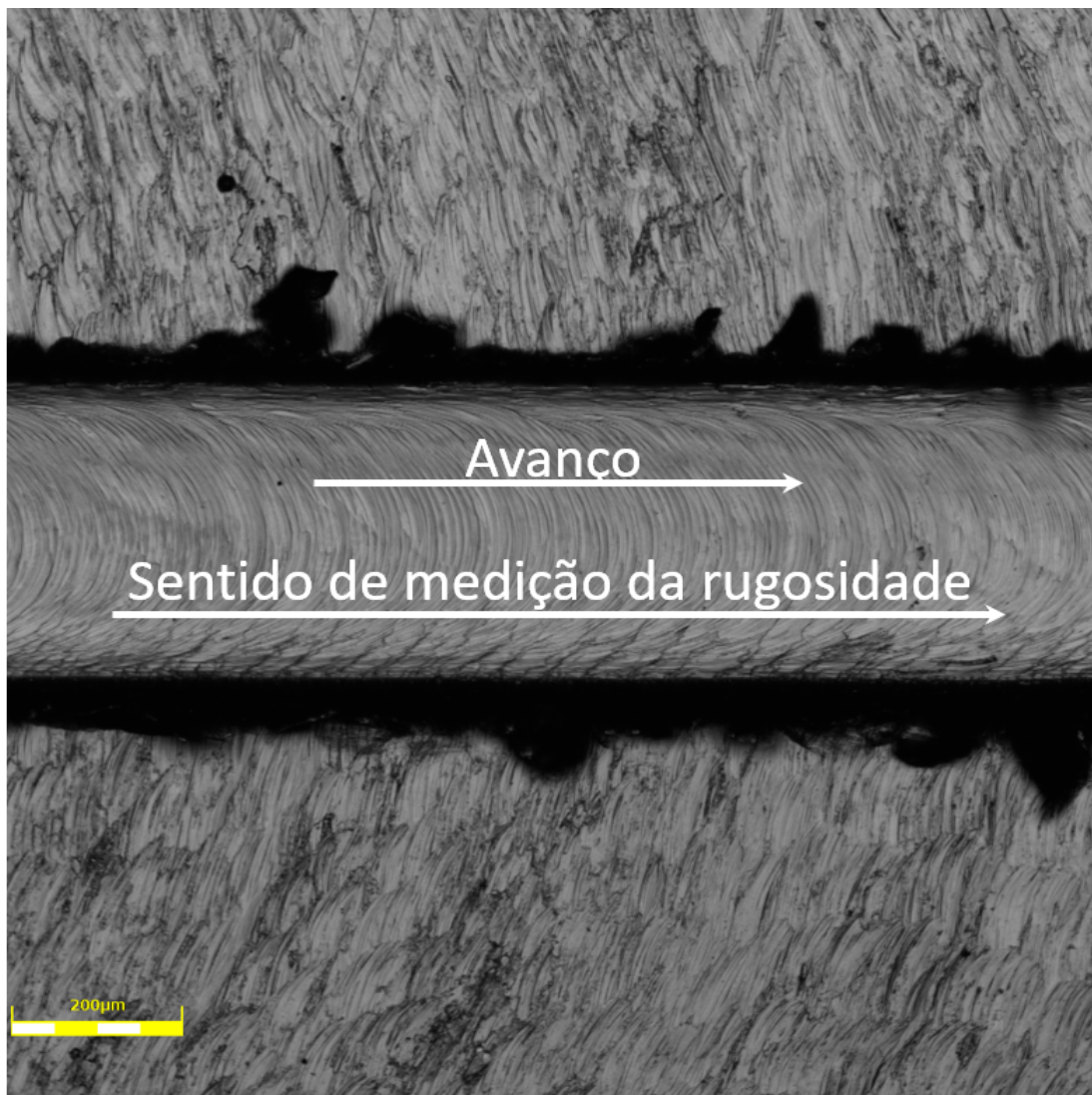


Figura 32 – Medição da rugosidade.

3.4.2 Medição de altura das rebarbas

Para a medição das alturas das rebarbas, é utilizada a função do microscópio de captura de imagem via laser, que analisa e determina o perfil da superfície de cada canal, como pode ser observado na Figura 33. As imagens capturadas mostraram as variações de relevo da peça. Desse modo, a partir da imagem é inserida uma linha de posicionamento, que define a região na qual se deseja obter as medidas da rebarba, após é posicionada uma linha vertical de referência, que deve coincidir com a superfície da peça. A linha de referência ficará fixa, e a linha de medição é ajustada nas extremidades das rebarbas. A partir da imagem, e das distâncias entre as duas linhas, o software é capaz de quantificar a altura das rebarbas. As medidas foram realizadas em cinco posições diferentes, para a obtenção da média entre elas, e o erro foi associado como duas vezes o desvio padrão, essa operação foi realizada para todos os canais microfresados antes e após os intervalos de rebarbação.

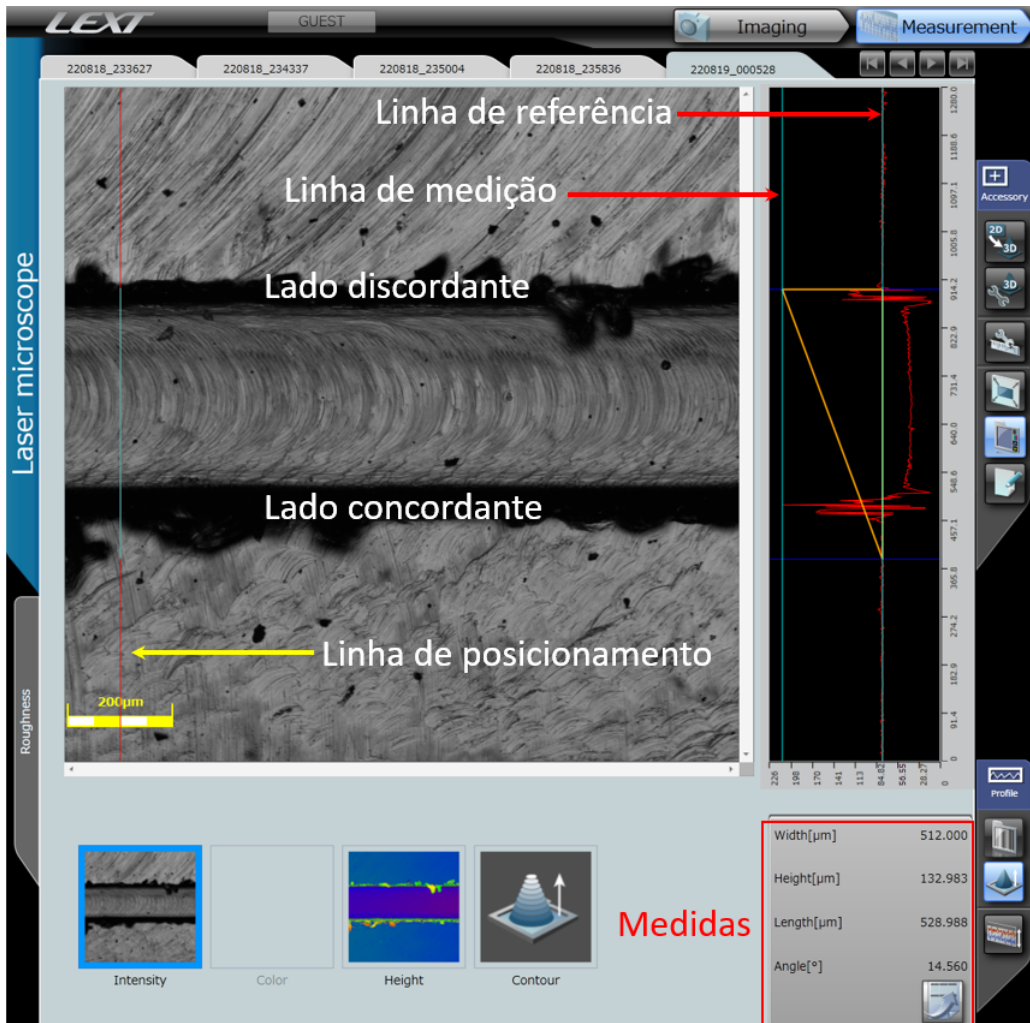


Figura 33 – Medição da rebarba.

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões relativas às variáveis de saída. Após as medições foram calculadas a média e o desvio padrão para cada canal, o erro associado a cada medição é duas vezes o desvio padrão. Para melhor compreensão, os dados obtidos no processo experimental são apresentados graficamente.

4.1 Rugosidade

Visando verificar se o processo de rebarbação iria gerar algum dano à superfície do canal, para as amostras ensaio e réplica, foram obtidos os valores médios da rugosidade média (R_a) para os 12 canais microfresados em cada amostra. Os valores foram obtidos antes do processo de rebarbação, e após o último intervalo de rebarbação de 4 min, como pode ser observado nas Figuras 34 e 35.

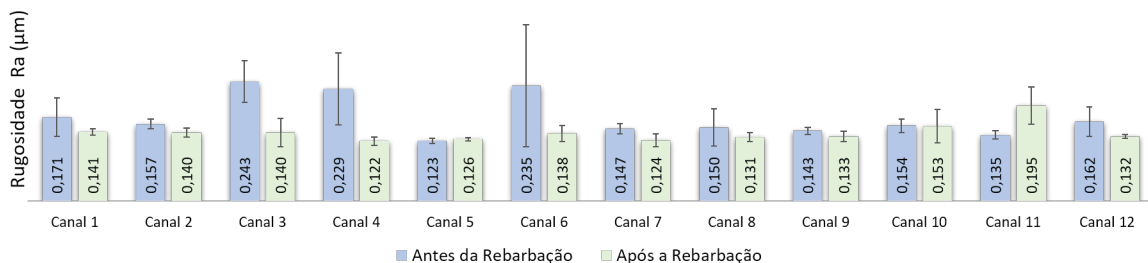


Figura 34 – Valores de rugosidade antes e após rebarbação para o ensaio.

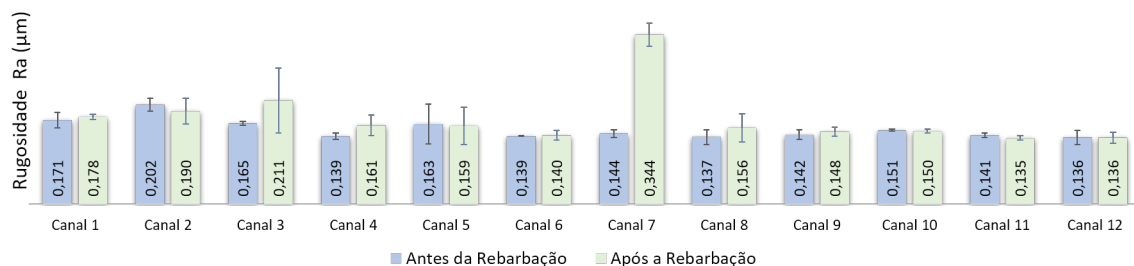


Figura 35 – Valores de rugosidade antes e após rebarbação para a réplica.

Após o processo de rebarbação, como pode ser observado na Figura 34 a tendência foi da diminuição do valor médio de R_a , alguns canais apresentaram um valor médio de

R_a maior após a rebarbação, como pode ser observado para o canal 11 da Figura 34, já para a réplica, como pode ser observado na Figura 35, a tendência da diminuição do valor médio de R_a é menor que para o ensaio, pois para a réplica os canais 1, 3, 4, 6, 7, 8 e 9 apresentaram valores maiores de R_a após a rebarbação. O comportamento de aumento dos valores médios de R_a , pode estar relacionado, ao contato dos abrasivos soltos e fragmentos de rebarbas com o fundo do canal durante o processo de polimento, e o alto desvio padrão resultante para alguns canais, o que influencia durante a avaliação do valor da rugosidade no fundo do canal.

A presença de material das rebarbas no fundo dos canais, podem ser observadas nas Figuras 36 a 39, a presença de material das rebarbas aumenta o valor da rugosidade, e em alguns casos foi necessário realizar a medição em outra posição do canal, para contornar esse problema. Somado a isso, pode-se notar a presença de estruturas finas e alongadas, foi verificado que estas são provenientes do pano utilizado durante o processo de polimento. Acredita-se, que devido à geometria das rebarbas não só houve o "enroscamento" de fios do pano de polimento, como pode ter havido o corte deles pelas rebarbas acentuando sua presença na peça, mesmo após a limpeza para a observação da superfície. Na Figura 40 pode ser observado a presença de fios do pano de polimento em uma parte do canal 7 da réplica, os fios obstruem boa parte do canal. A distinção entre os fios do pano de polimento e as rebarbas, foi observada na etapa de pré-processamento das imagens, pois nessa etapa os fios do pano de polimento apresentavam a coloração amarela, enquanto as rebarbas apareciam na cor preta.

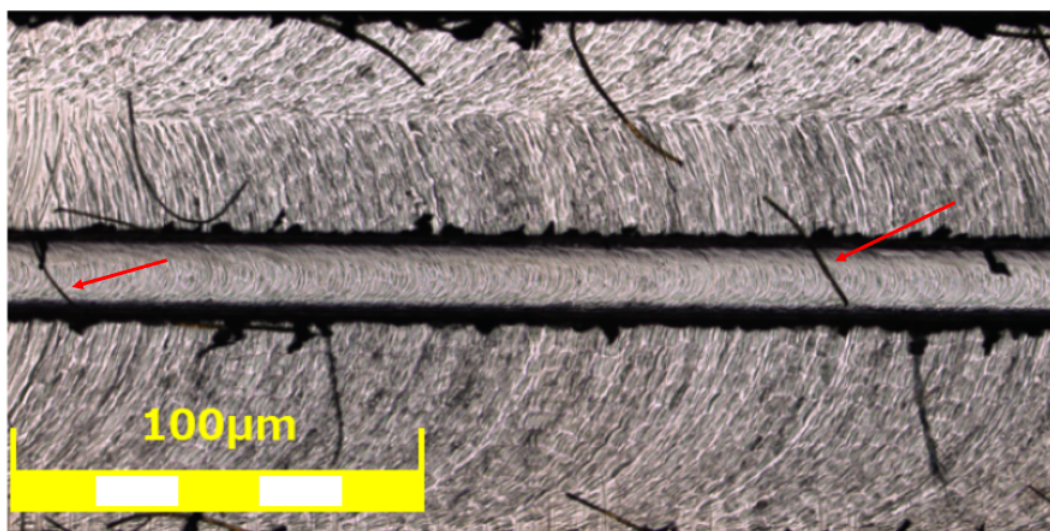


Figura 36 – Presença de rebarbas no fundo do canal 11 da réplica.

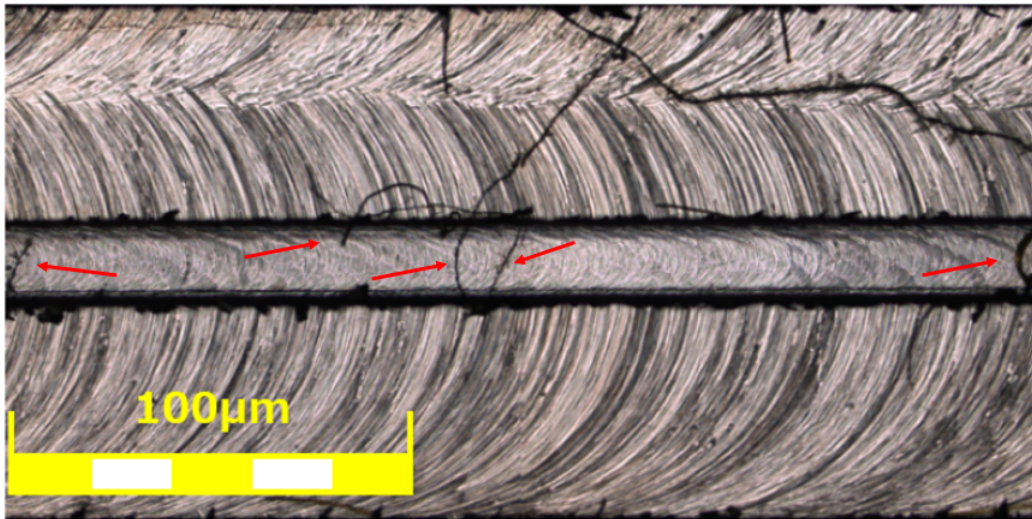


Figura 37 – Presença de rebarbas no fundo do canal 3 do ensaio.

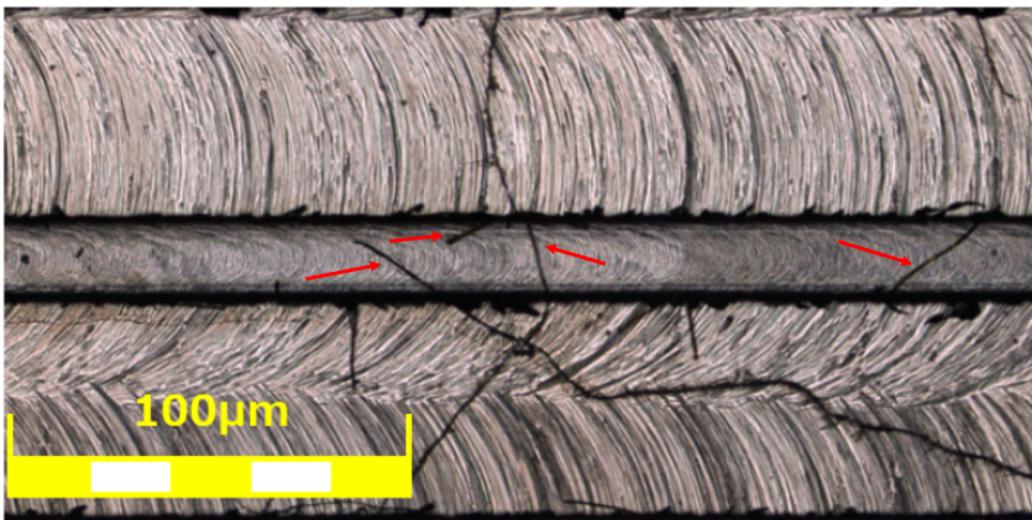


Figura 38 – Presença de rebarbas no fundo do canal 4 do ensaio.

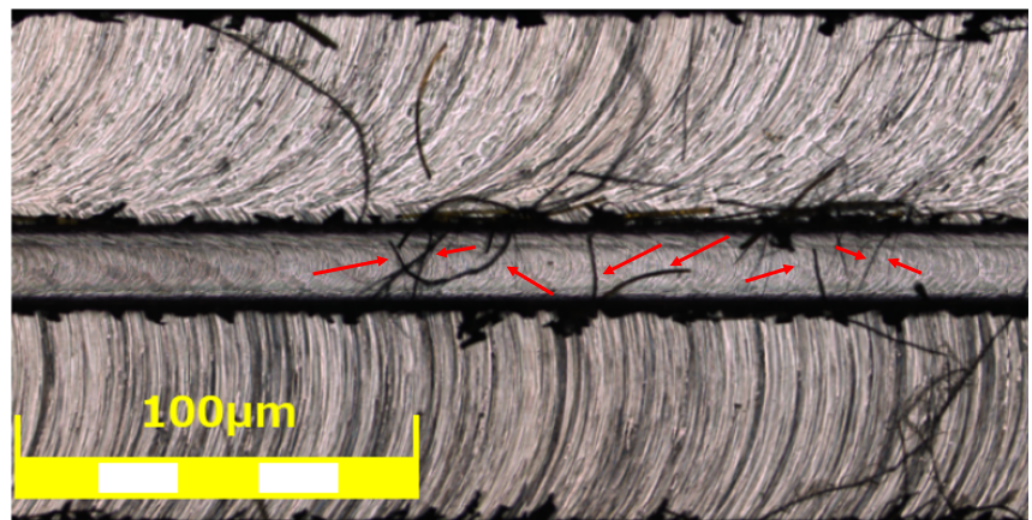


Figura 39 – Presença de rebarbas no fundo do canal 6 do ensaio.

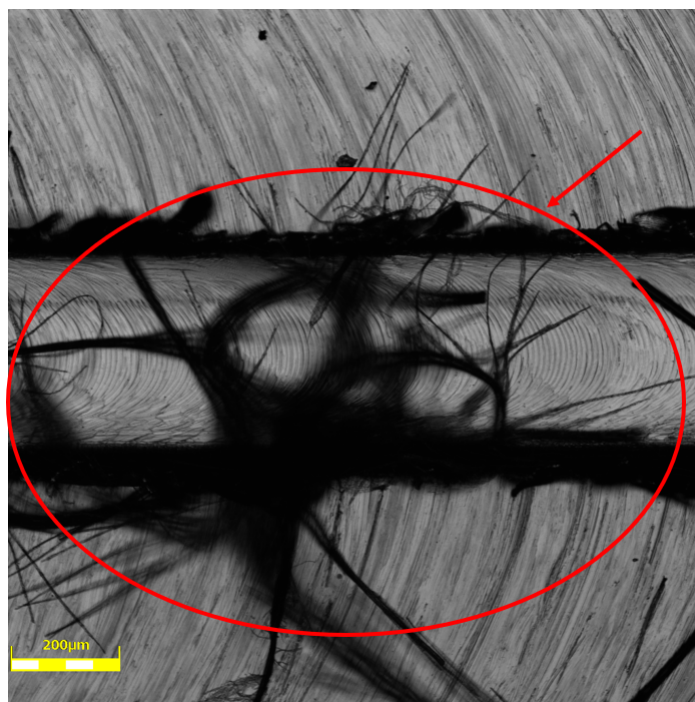


Figura 40 – Presença de fios do pano de polimento no canal 7 da réplica.

Silva (2021) observou que após a rebarbação da réplica, a média dos maiores valores de Ra para os 12 canais da amostra obtida foi de $0,188 \mu m$. Neste trabalho, com a utilização do polimento mecânico, a média dos maiores valores de Ra para os 12 canais foi de $0,176 \mu m$, valor inferior ao obtido com a utilização das lixas, que por ser um processo mais abrasivo que o polimento mecânico e com uma maior taxa de remoção de material, pode ter criado riscos no fundo do canal, pela ação de abrasivos soltos gerados no processo, que entram em contato com a superfície do fundo do canal. FANG et al. (2021) obtiveram a rugosidade de $0,167 \mu m$, valor próximo ao valor médio que foi obtido neste trabalho, que resultou em $0,176 \mu m$.

Aslantas e Çiçek (2018), analisaram os valores da rugosidade média, para diferentes condições lubrificação da amostra de Inconel 718 microfresada, o menor valor obtido para rugosidade foi para o microfresamento MQL, que resultou em $0,200 \mu m Ra$, valor próximo ao obtido neste trabalho, que foi de $0,176 \mu m$.

4.2 Altura das Rebarbas

Com o objetivo de comparar a influência do tempo de rebarbação nas alturas das rebarbas, os valores médios foram obtidos para as condições: antes da rebarbação e para os intervalos de rebarbação de 1 min, 2 min e 4 min, tanto para a amostra denominada ensaio quanto para a réplica. Foram analisados os valores médios para as alturas das rebarbas concordante e discordante, de forma independente, como pode ser observado nas Figuras 41 a 48.

Para o ensaio, pode ser observado nas Figuras 41 a 44, que o comportamento geral para os canais é de que as rebarbas discordantes apresentam valores médios menores que as concordantes. Na Figura 41 pode ser observado que apenas para os canais 5 e 8 as rebarbas discordantes são maiores que as concordantes. Na Figura 42 pode ser observado que apenas para os canais 9, 10, 11 e 12 as rebarbas discordantes são maiores que as concordantes. Na Figura 43 pode ser observado que apenas no canal 1 a rebarba discordante foi maior que a concordante. Na Figura 44 pode ser observado que apenas para os canais 1 e 4 as rebarbas discordantes são maiores que as concordantes. A tendência apresentada pelo desvio padrão, foi de menores valores para alguns canais, de acordo com o aumento dos intervalos de rebarbação, que pode ser associada a uniformização no tamanho das rebarbas, que ocorre após o processo de rebarbação.

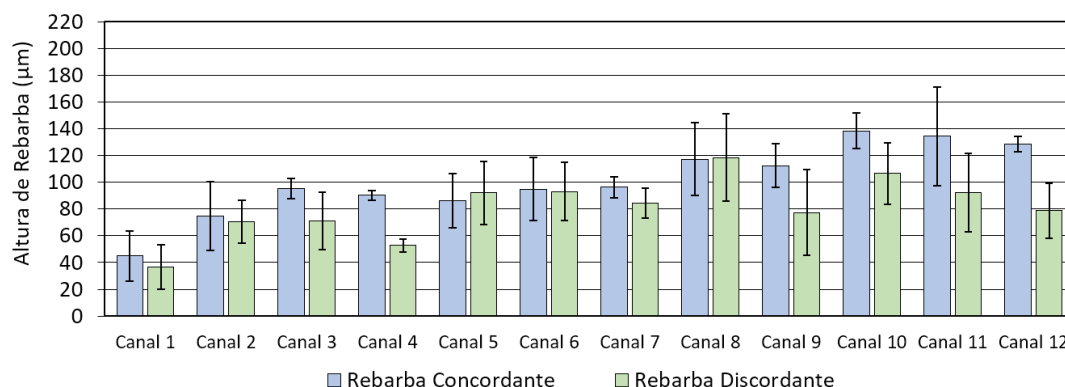


Figura 41 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio antes de rebarbar.

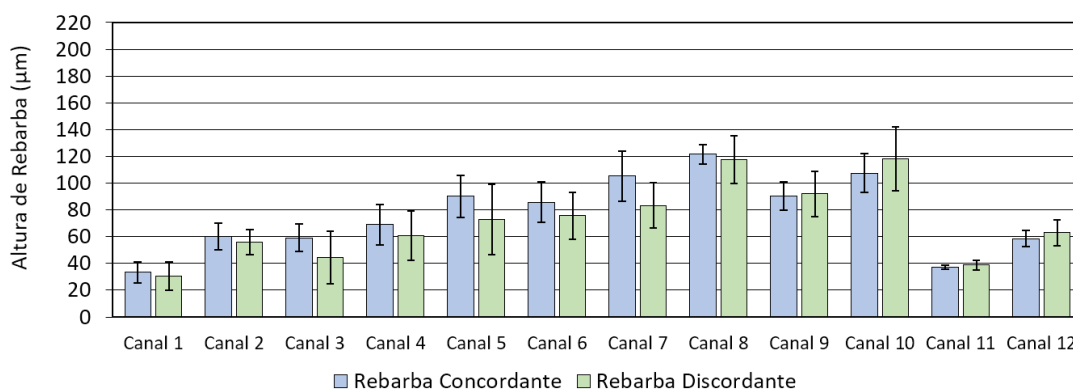


Figura 42 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio após 1 minuto de rebarbação.

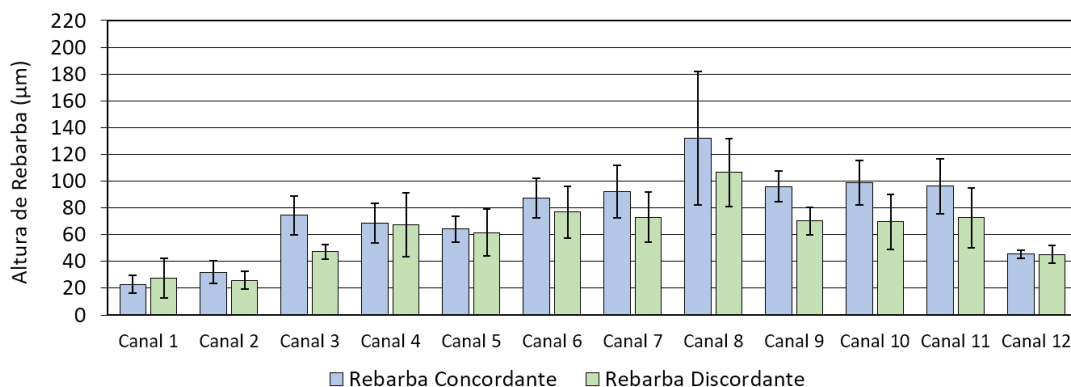


Figura 43 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio após 2 minutos de rebarbação.

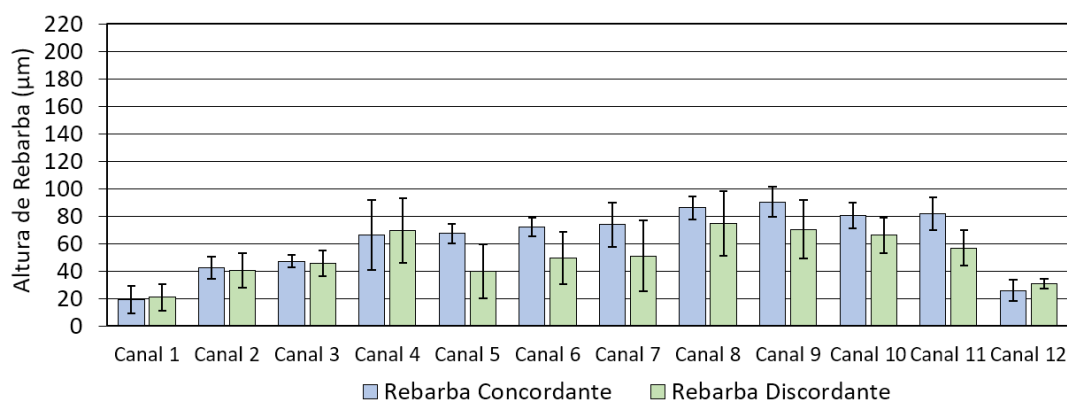


Figura 44 – Valores de altura de rebarbas para o ensaio após 4 minutos de rebarbação.

Para a réplica, pode ser observado nas Figuras 45 a 48, que o comportamento geral para os canais é de que as rebarbas discordantes apresentam valores médios menores que as concordantes. Na Figura 45 pode ser observado que para os canais 7, 8, 9, 10, 11 e 12 as rebarbas discordantes são maiores que as concordantes, nesse caso a tendência da rebarbas discordantes apresentarem valores médios menores que as concordantes não ocorreu. Na Figura 46 pode ser observado que apenas para os canais 1, 5, 7 e 10 as rebarbas discordantes são maiores que as concordantes. Na Figura 47 pode ser observado que apenas para os canais 1, 7 e 8 as rebarbas discordantes são maiores que as concordantes. Na Figura 48 pode ser observado que apenas para os canais 1 e 3 as rebarbas discordantes são maiores que as concordantes. A tendência apresentada pelo desvio padrão, foi de menores valores para alguns canais, de acordo com o aumento dos intervalos de rebarbação, que pode ser associada a uniformização no tamanho das rebarbas, que ocorre após o processo de rebarbação.

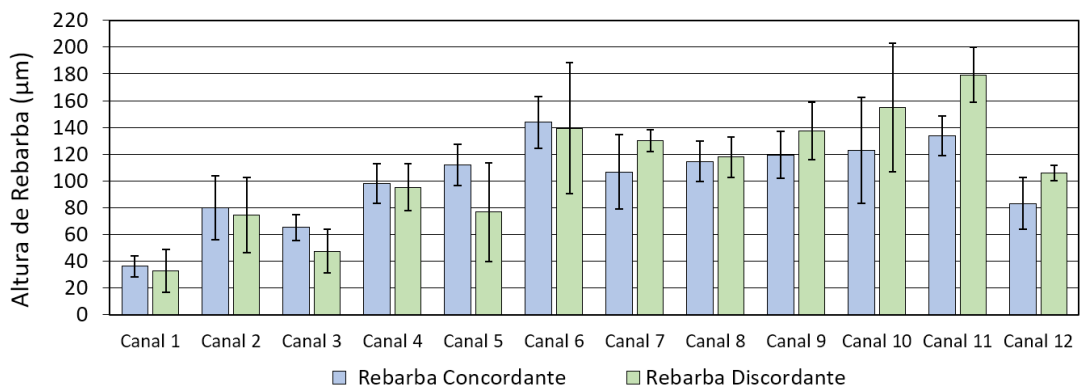


Figura 45 – Valores de altura de rebarbas para a réplica antes de rebarbar.

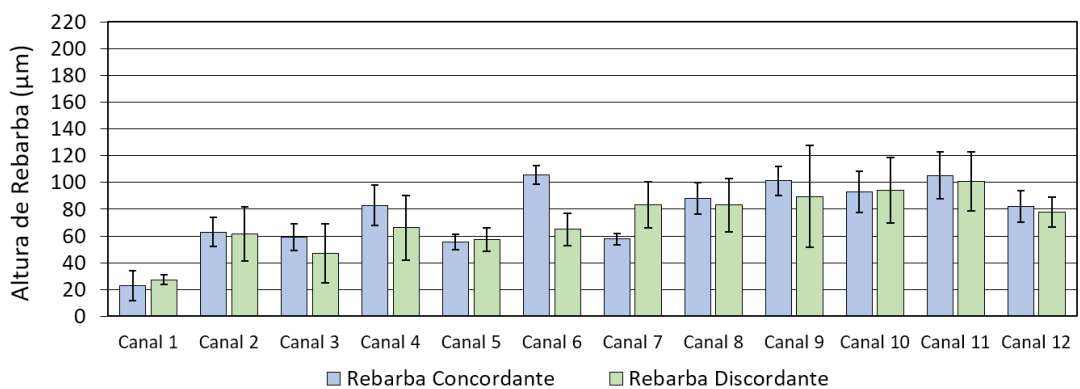


Figura 46 – Valores de altura de rebarbas para a réplica após 1 minuto de rebarbação.

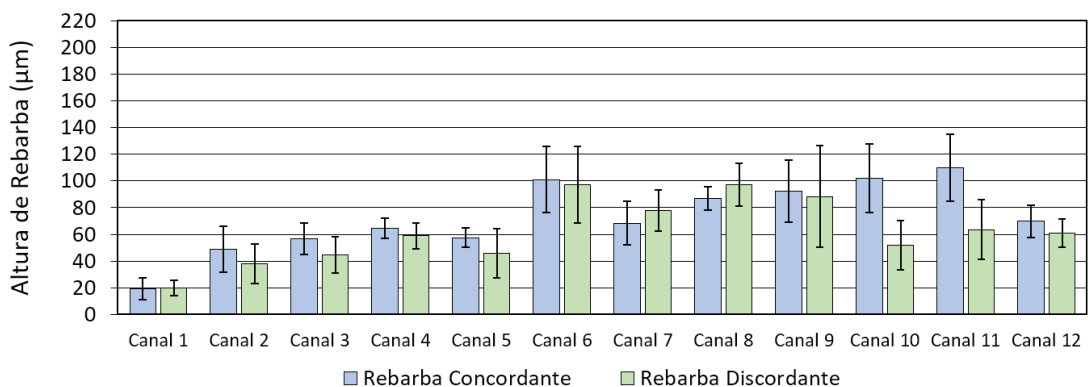


Figura 47 – Valores de altura de rebarbas para a réplica após 2 minutos de rebarbação.

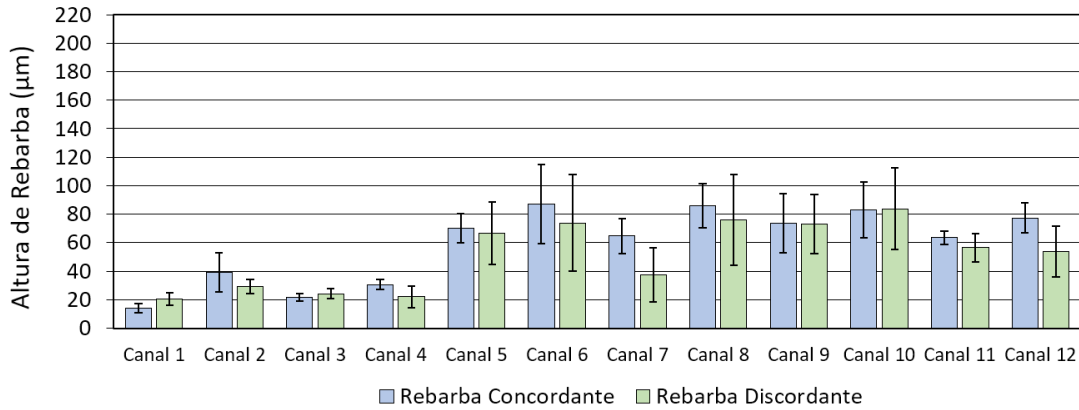


Figura 48 – Valores de altura de rebarbas para a réplica após 4 minutos intervalo de rebarbação.

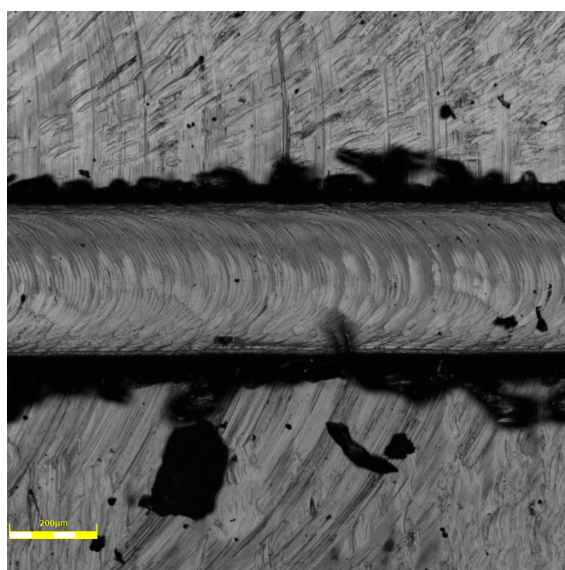
A partir da análise das Figuras 41 a 48, observa-se que as rebarbas discordantes apresentam valor médio de altura, menor que as rebarbas concordantes, esse comportamento é coerente com o encontrado por FANG et al. (2021), que realizaram o microfresamento de inonel 718, com microfresa de 1 mm de diâmetro, 4 mm de comprimento, raio da aresta de corte de 10 µm, rotação de 15000 rpm, profundidade de corte de 40 µm, e avanço por dente de 5 µm. Os autores relatam que as rebarbas discordantes são ligeiramente menores que as rebarbas concordantes.

As diferenças de tamanhos das rebarbas concordantes e discordante, foram observadas também por Ziberov (2018), que estudou o microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V, com a utilização de microferramentas de metal duro com diâmetro de 152,4 µm, as ferramentas foram utilizadas com e sem revestimentos de TiAlN e DLC, a rotação empregada foi de 20000 rpm. Ao analisar a altura das rebarbas, quando a microferramenta atingiu o critério de fim de vida, o autor observou que a altura da rebarba no lado concordante variou de 1,236 µm a 6,684 µm, e no lado discordante a variação foi de 0,622 µm a 16,977 µm, que evidência a diferença para os valores de altura entre as rebarbas concordantes e discordantes.

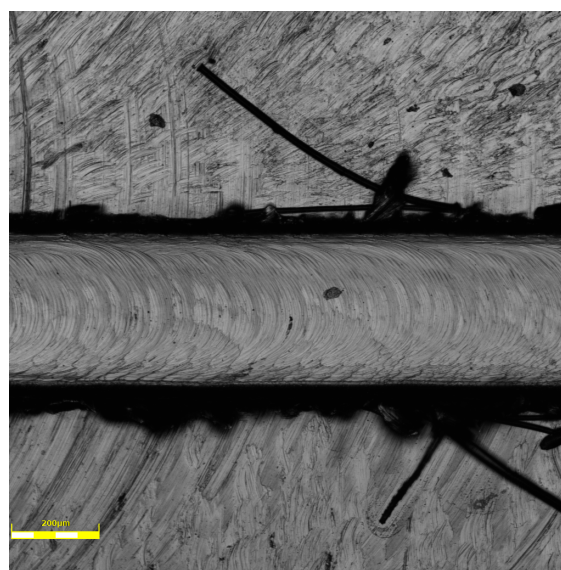
Silva (2021) analisou uma amostra de Inonel 718, que passou pelo processo de microfresamento, a amostra foi submetida aos seguintes parâmetros de corte, velocidade de rotação de 11000 rpm, velocidade de corte 13,8 m/min, avanço por dente de 5 µm, profundidade de corte de 40 µm e penetração de trabalho de 400 µm. A amostra denominada como "réplica" passou pelo processo de rebarbação abrasiva por meio de uma lixa, com a granulometria de 1200. O lixamento das amostras foi feito com a utilização de uma lixadeira manual roto-orbital Pantec Polipan 2, a rotação empregada foi de 120 rpm, o processo de lixamento foi realizado durante 30 s. Semelhante a este trabalho, o autor observou a tendência das rebarbas concordantes serem maiores que as discordantes e percebeu que algumas vezes, a diferença de altura entre as rebarbas concordante e discordante foi maior que 100%.

Aslantas e Çiçek (2018) analisaram o microfresamento de Inconel 718 com microfresas de $600\ \mu\text{m}$, revestidas de TiCN. Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte de $31,4\ \text{m/min}$, profundidade de corte de $100\ \mu\text{m}$. O microfresamento foi realizado em diferentes condições de lubrificação, mínima quantidade de lubrificação, etanol, inundado e a seco. Os autores avaliaram a largura das rebarbas e verificaram que, as rebarbas discordantes no geral são menores que as concordantes, comportamento semelhante ao observado nesse trabalho.

Para o ensaio, após o início da rebarbação, a maior diferença do valor médio da altura entre as rebarbas concordante e discordante, ocorreu no canal 10, depois do segundo intervalo de rebarbação, no qual a amostra foi rebarbada por 2 minutos, que resultou em uma diferença de $29,252\ \mu\text{m}$, que pode ser observada na Figura 43. Nas Figuras 49(a) e 49(b), pode ser observada a microscopia da região central do canal 10, na qual as rebarbas superiores são as discordantes e as inferiores são concordantes. Qualitativamente percebe-se um comportamento de diminuição das rebarbas após o intervalo de rebarbação, resultado que é comprovado quantitativamente na Figura 43, qualitativamente observa-se, que as rebarbas apresentam um formato mais uniforme, e percebe-se, que as rebarbas discordantes possuem um formato mais regular do as rebarbas concordantes.



(a) Região central do canal 10 do ensaio antes da rebarbação.

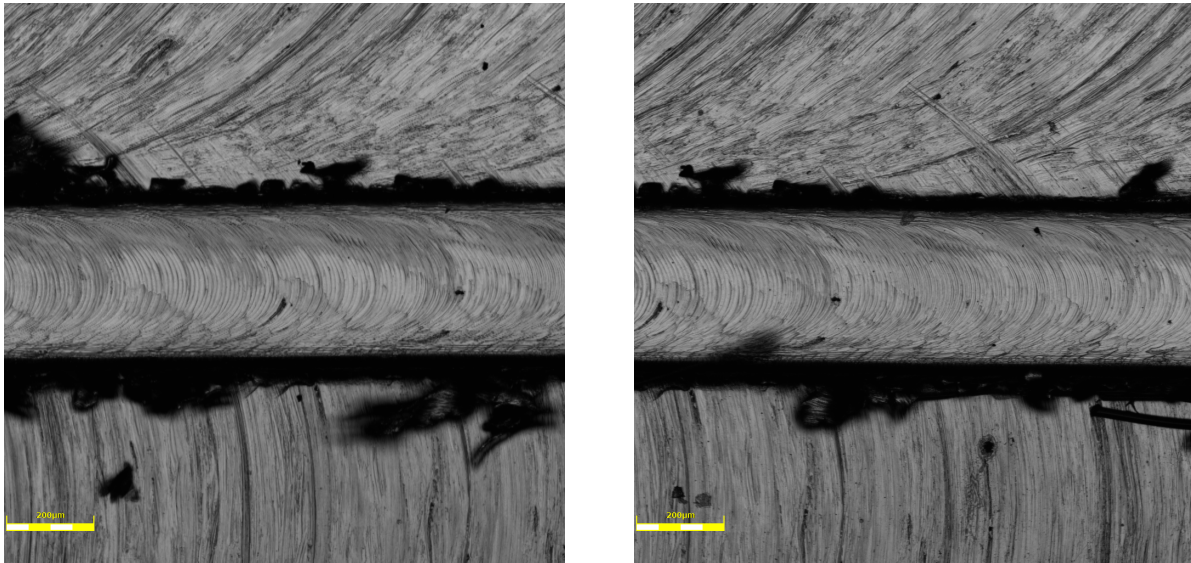


(b) Região central do canal 10 do ensaio após 2 min de rebarbação.

Figura 49 – Região central do canal 10 do ensaio antes e após rebarbação.

Para a réplica, após o início da rebarbação, a maior diferença do valor médio da altura entre a rebarba concordante e discordante, foi para o canal 10, depois do segundo intervalo de rebarbação, no qual a amostra foi rebarbada por 2 minutos, que resultou em uma diferença de $49,994\ \mu\text{m}$, que pode ser observada na Figura 47. Nas Figuras 50(a) e 50(b), pode ser observada a microscopia da região central do canal 10, na qual as rebarbas superiores são as discordantes e as inferiores são concordantes. Qualitativamente percebe-

se que houve a diminuição das rebarbas após o intervalo de rebarbação, resultado que é comprovado quantitativamente na Figura 47, qualitativamente observa-se, que as rebarbas apresentam um formato mais uniforme, e percebe-se que as rebarbas discordantes possuem um formato mais regular do que as rebarbas concordantes.



(a) Região central do canal 10 da réplica antes da rebarbação.

(b) Região central do canal 10 da réplica após 2 min de rebarbação.

Figura 50 – Região central do canal 10 da réplica antes e após rebarbação.

4.3 Evolução Altura das Rebarbas

Nas Figuras 51 a 54, pode ser observado a evolução da altura das rebarbas após os diferentes intervalos de rebarbação. A tendência apresentada pelos canais, considerando os valores médios, foi de redução no valor de altura da rebarba, de acordo com o aumento dos intervalos de rebarbação. Em alguns canais, como pode ser observado na Figura 52 para a rebarba discordante do canal 4 do ensaio, após a rebarbação as rebarbas aumentaram, que pode estar associado ao fato de a rebarba estar inicialmente achatada, e durante a cinemática do processo ocorrer o seu alongamento, esse comportamento pode estar ligado ao complexo processo de formação das rebarbas. Segundo Cunha (2016), a formação de rebarbas é um parâmetro difícil de ser avaliado, pois não é um fenômeno objetivamente periódico e cíclico.

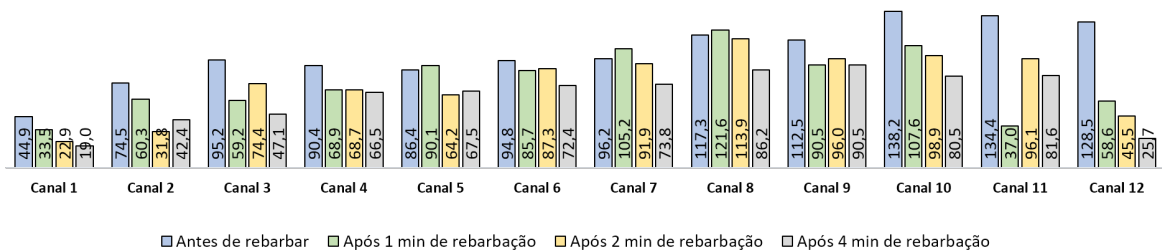


Figura 51 – Valores de altura de rebarbas concordantes para o ensaio antes e após intervalos de rebarbação.

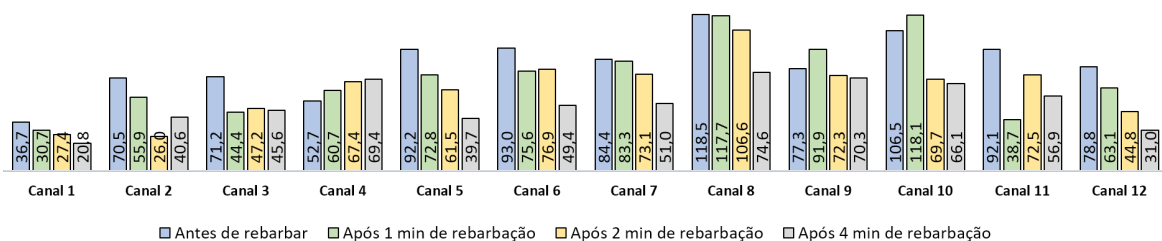


Figura 52 – Valores de altura de rebarbas discordantes para o ensaio antes e após intervalos de rebarbação.

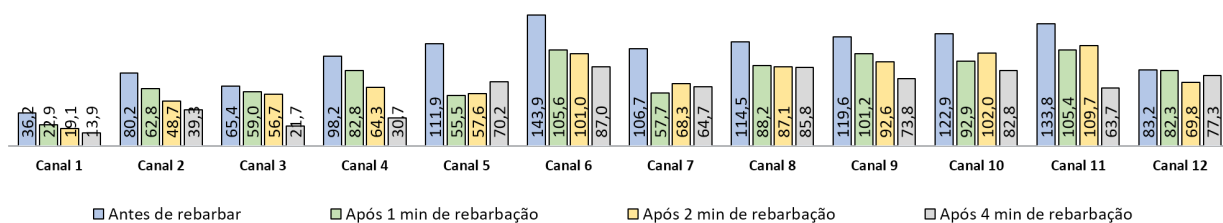


Figura 53 – Valores de altura de rebarbas discordantes para a réplica antes e após intervalos de rebarbação.

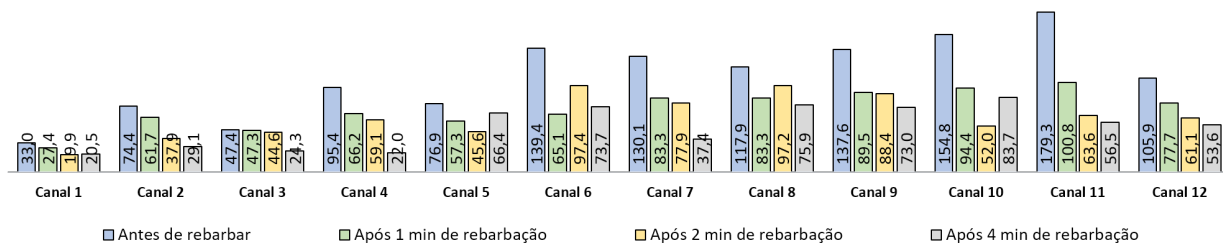
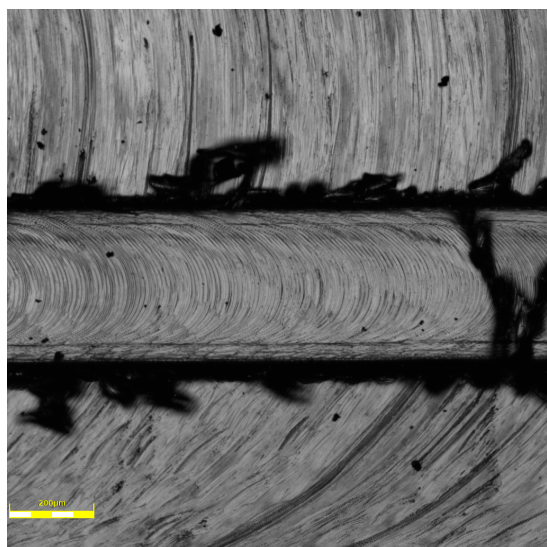


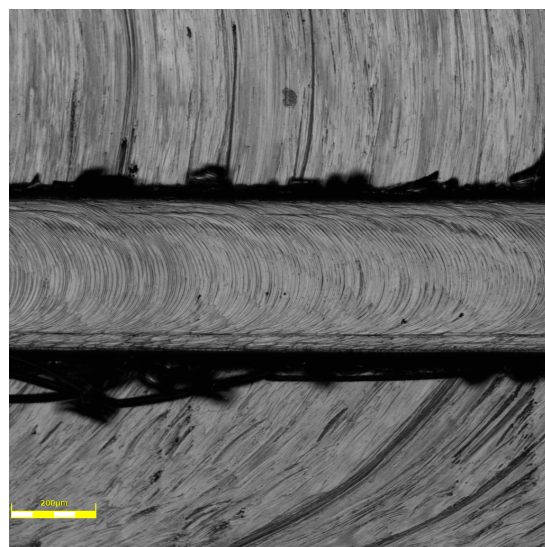
Figura 54 – Valores de altura de rebarbas discordantes para a réplica antes e após intervalos de rebarbação.

Para o canal 4 da réplica, pode ser observado nas Figuras 53 e 54, a redução de forma quantitativa, para as rebarbas concordante e discordante, de acordo com o aumento

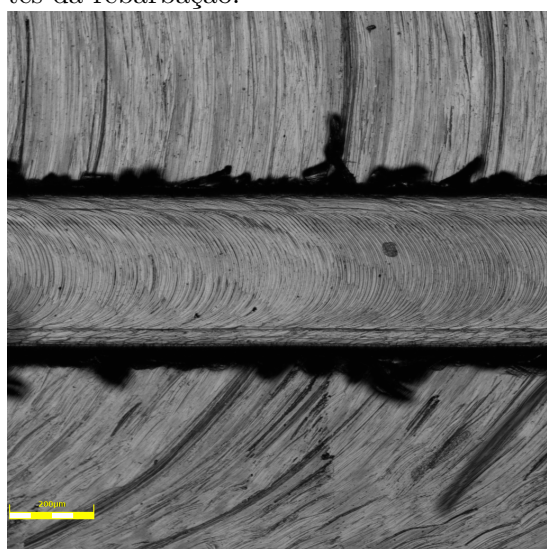
dos intervalos de rebarbação. Nas Figuras 55(a) a 55(d), pode ser observado a microscopia da região central do canal 4, que permite observar de forma qualitativa a redução da altura das rebarbas, a rebarba apresenta um comportamento mais regular, tende a um formato linear, de acordo com o aumento dos intervalos de rebarbação.



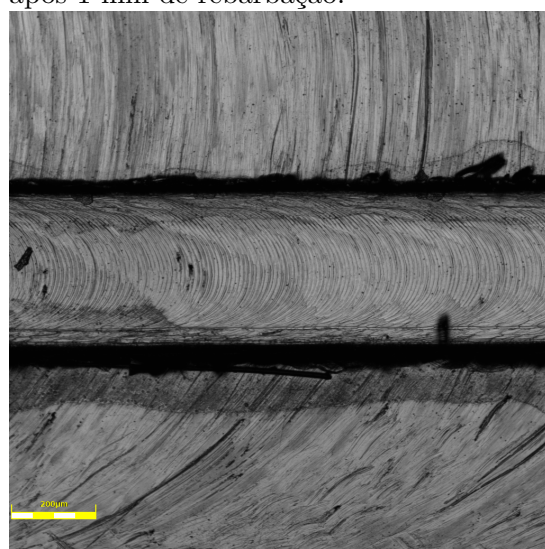
(a) Região central do canal 4 da réplica antes da rebarbação.



(b) Região central do canal 4 da réplica após 1 min de rebarbação.



(c) Região central do canal 4 da réplica após 2 min de rebarbação.



(d) Região central do canal 4 da réplica após 4 min de rebarbação.

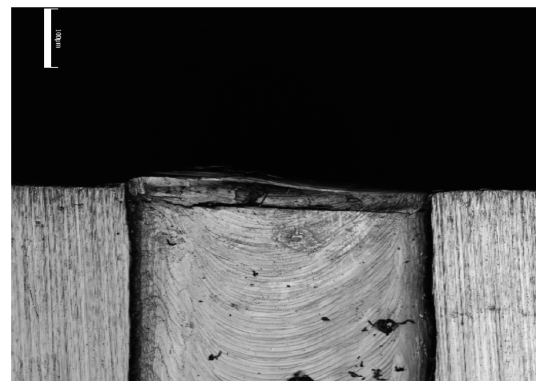
Figura 55 – Região central do canal 4 da réplica antes e após rebarbação.

Silva (2021) observou que através do lixamento, foi possível obter a remoção completa de rebarbas em alguns dos microcanais da amostra de Inconel 718, como pode ser observado qualitativamente na Figura 56(b), observa-se que houve a remoção total das rebarbas em relação à antes da rebarbação, que pode ser observada na Figura 56(a), entretanto, após a rebarbação, a superfície da amostra ficou riscada, pois inicialmente a amostra continha riscos na superfície orientados horizontalmente, que pode ser observado na Figura 56(a), e após a rebarbação, a superfície da amostra apresentou riscos orientados

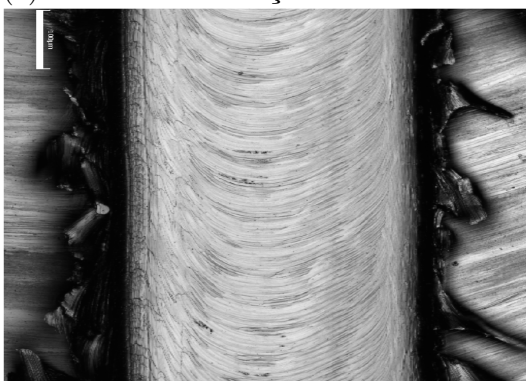
verticalmente, Figura 56(b). Esses riscos podem estar associados à alta taxa de remoção de material do lixamento e granulometria da lixa, que quanto maior, tem maior capacidade de remoção de material e gera mais riscos. Para as outras partes do canal Figura 56(c) a (f), percebe-se a diminuição das rebarbas, mas não sua remoção completa. A amostra denominada "ensaio" pelo autor, se diferencia da amostra réplica abordada previamente, apenas na granulometria da lixa, que para o ensaio foi de 800. O autor observou que as rebarbas concordantes apresentavam alturas em entre $300 \mu m$ a $400 \mu m$, após a rebarbação com o lixamento de 30 s, os valores ficaram abaixo de $15 \mu m$, para os canais em que as rebarbas não foram removidas completamente, o que significa que houve uma redução no tamanho das rebarbas de pelo menos 95 %.



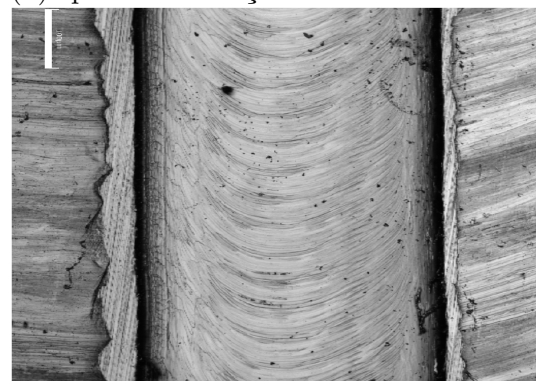
(a) Antes da rebarbação



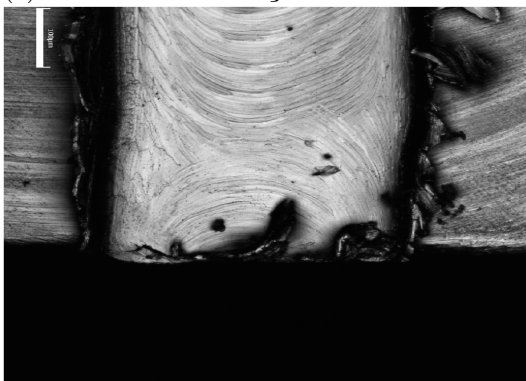
(b) Após a rebarbação



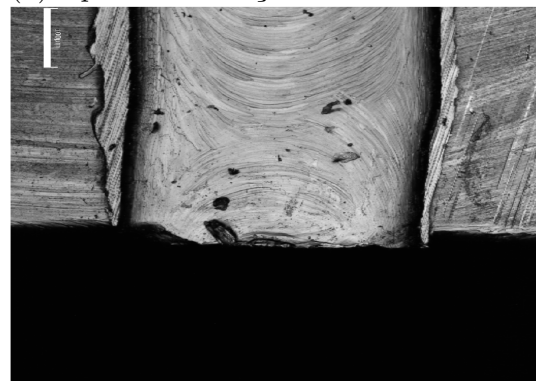
(c) Antes da rebarbação



(d) Após a rebarbação



(e) Antes da rebarbação

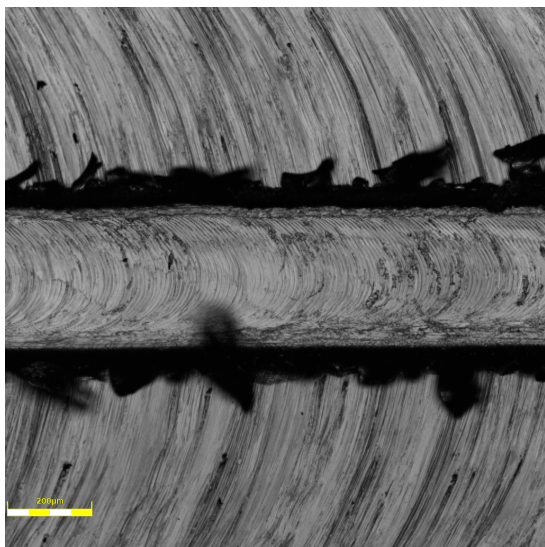


(f) Após a rebarbação.

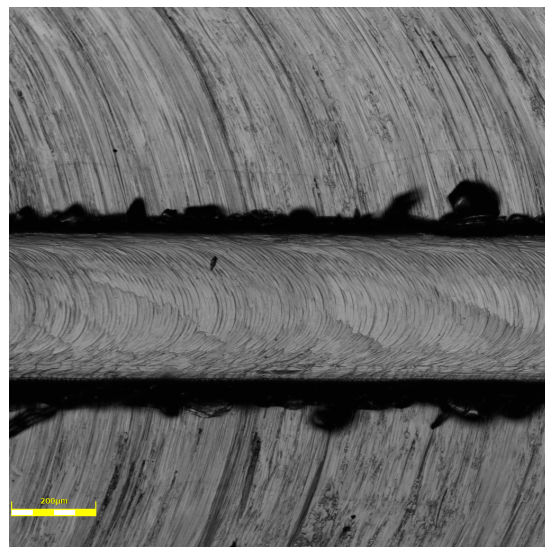
Figura 56 – Diferentes regiões do micro canal 12 do ensaio. Fonte: (SILVA, 2021).

Para o polimento mecânico abordado nesse trabalho, não ocorreu a remoção com-

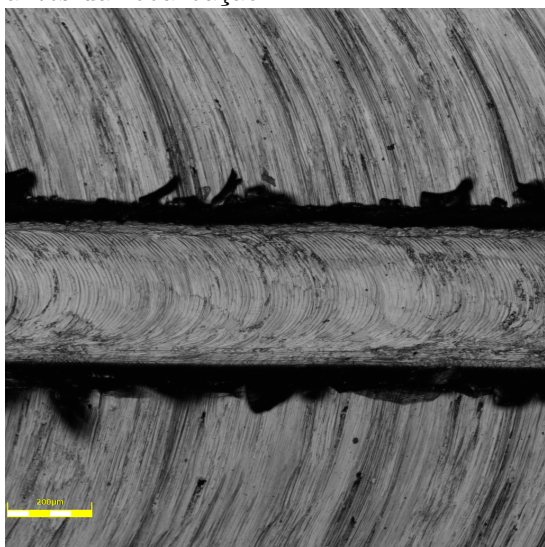
pleta das rebarbas para nenhum dos canais. A maior taxa de remoção de material alcançada pelo polimento, foi considerando o estado antes da rebarbação e após 4 min de rebarbação, que resultou na redução do valor médio da altura da rebarba discordante em 68,5 %, para o canal 11 da réplica, que pode ser observado de forma quantitativa na Figura 54, e de forma qualitativa nas Figuras 57(a) a 57(d), as rebarbas apresentam um comportamento mais regular, tendem a um formato linear, de acordo com o aumento dos intervalos de rebarbação.



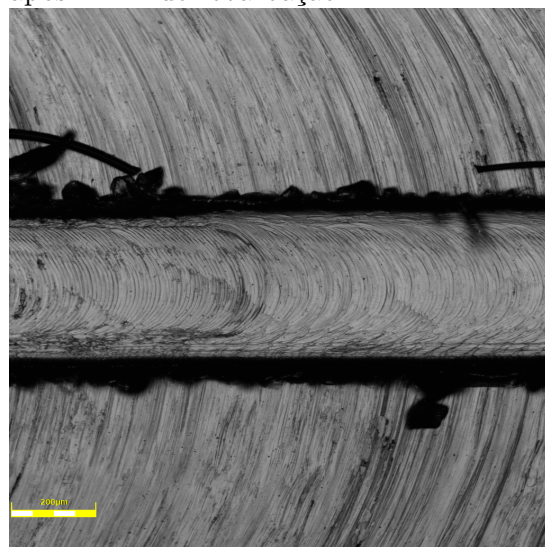
(a) Região central do canal 11 da réplica antes da rebarbação.



(b) Região central do canal 11 da réplica após 1 min de rebarbação.



(c) Região central do canal 11 da réplica após 2 min de rebarbação.



(d) Região central do canal 11 da réplica após 4 min de rebarbação.

Figura 57 – Região central do canal 11 da réplica antes e após rebarbação.

De acordo com Marinescu et al. (2004), a ação de abrasão do polimento é suave, e apresenta baixa taxa de remoção de material, esse processo é comumente utilizado quando a geometria da peça já está muito próxima da geometria final, de modo que o principal objetivo do polimento é modificar a textura superficial da peça, que permite obter uma

superfície espelhada e reflexiva sem interferir em sua geometria; desse modo, o fato do polimento não ter conseguido remover completamente as rebarbas, pode estar associado à sua baixa taxa de remoção de material.

Pode ser observado nas Figuras 51 e 52, que o valor médio da altura das rebarbas para o ensaio antes da rebarbação, e após 1 minuto de rebarbação, apresenta valores menores para as rebarbas concordantes e discordantes, para os canais 1, 2, 3, 6, 11 e 12. Os canais 4,9 e 10 apresentaram redução apenas para o valor médio da altura da rebarba concordante, e os canais 5,7 e 8 apresentaram redução apenas para o valor médio da altura da rebarba discordante. O comportamento do aumento da rebarba após um intervalo de rebarbação, pode estar associado a rebarba ter uma geometria esbelta, corpo fino e devido ao material ter matriz dúctil, de modo que ao passar pelo polimento mecânico, a rebarba pode tanto amassar, gerando uma redução na altura que não ocorreu especificamente devido à sua remoção, quanto pode levantar, de modo que ela não ficou necessariamente maior, apenas mais alta. Ressalta-se ainda possíveis desvios associados ao fato de que as medições podem não ter sido realizadas exatamente no mesmo local, e que há o erro de medição, associado ao desvio padrão.

Nas Figuras 51 e 52 pode ser observado para o ensaio, o valor médio da altura das rebarbas antes da rebarbação e após 2 minutos de rebarbação. O comportamento apresentado é de redução do valor médio da altura para as rebarbas concordantes e discordantes, nos canais 1, 2, 4, 5 e 7 a 12, os canais 3 e 6 apresentam redução apenas para o valor médio da altura da rebarba discordante. Para a rebarbação, após 4 minutos de rebarbação em relação ao estado antes de rebarbar, houve redução do valor médio da altura das rebarbas para todos os canais. Pode ser observado nas Figuras 53 e 54, que para a réplica, houve a redução da altura das rebarbas para todos os canais em todos os intervalos de rebarbação, com relação ao estado antes de rebarbar.

5 Conclusão

Após a realização dos ensaios de rebarbação de canais microusinados, com diferentes tempos, as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

- Notou-se que o processo de formação de rebarbas, que é um efeito indesejado recorrente na escala micro, é um processo complexo, visto que a formação de rebarbas não segue um comportamento padrão, durante as medições, o comportamento não uniforme da altura das rebarbas, resultou em um alto desvio padrão, principalmente antes da rebarbação da amostra.
- No geral as rebarbas diminuíram, o método do polimento mecânico, conseguiu reduzir em até 68,5 % o tamanho das rebarbas, sem provocar modificação na geometria da amostra;
- O polimento mecânico, é um método abrasivo de simples aplicação e baixo custo, que apresentou bons resultados para remoção das rebarbas, pois permitiu a remoção de parte das rebarbas sem modificar a geometria da amostra.
- A presença de fragmentos de rebarbas no fundo do canal, fios do pano de polimento e defeitos na superfície do fundo do canal, provocam grandes imprecisões na medição da rugosidade. A rebarbação no geral ocasionou a diminuição da rugosidade do fundo do canal.
- A partir dos tempos de rebarbação utilizados, 1, 2 e 4 min, não foi possível chegar a um tempo ótimo de rebarbação. O comportamento geral, foi de diminuição do tamanho da rebarba, de acordo com a aplicação de maiores intervalos de rebarbação, portanto seria necessária a investigação da aplicação de mais tempos de rebarbação e acompanhamento da evolução do tamanho das rebarbas, para então verificar-se a existência de um tempo ótimo para remoção das rebarbas, através do polimento mecânico.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicar mais intervalos de tempo na rebarbação abrasiva através do polimento mecânico, e investigar o tempo ótimo de polimento.

- Aplicar o método do polimento mecânico aliado ao lixamento, com a finalidade de que haja a remoção completa das rebarbas sem afetar a geometria das amostras rebarbadas.
- Aplicar o método do polimento mecânico em materiais de alta usinabilidade, e investigar a efetividade do polimento mecânico na remoção de rebarbas em peças microfresadas.
- Investigar a influência da utilização de diferentes pesos sobre a amostra, durante o processo de rebarbação abrasiva através do polimento mecânico.

Referências

Akrapovic. *HIGH-END SUPERIOR PERFORMANCE-ORIENTED*. 2022. Disponível em: <<https://www.akrapovic-foundry.com/en/materials>>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2022. Citado na página 6.

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, v. 33, n. 4, p. 402–407, 2009. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635908001529>>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 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. ISSN 2212-8271. 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118310680>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 42.

BALOGUN, V. A.; EDEM, I. F.; ADEKUNLE, A. A.; MATIVENGA, P. T. Specific energy based evaluation of machining efficiency. *Journal of Cleaner Production*, v. 116, p. 187–197, 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615019319>>. Citado na página 11.

Ben Achour, S.; BISSACCO, G.; BEAUCAMP, A.; De Chiffre, L. Deterministic polishing of micro geometries. *CIRP Annals*, v. 69, n. 1, p. 305–308, 2020. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850620301165>>. Citado na página 18.

BERESTOVSKIY, D.; HUNG, W. N. P.; LOMELI, P. Surface Finish of Ball-End Milled Microchannels. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, v. 2, n. 4, 09 2014. ISSN 2166-0468. 041005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4028502>>. Citado na página 2.

BISSACCO, G.; HANSEN, H.; De Chiffre, L. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 167, n. 2, p. 201–207, 2005. ISSN 0924-0136. 2005 International Forum on the Advances in Materials Processing Technology. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605006187>>. Citado na página 10.

CALLISTER, W. D. Materials science and engineering: An introduction, 7th edition. In: . [S.l.: s.n.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas ix e 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. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505001306>>. Citado na página 11.

CHERN, G.-L.; WU, Y.-J. E.; CHENG, J.-C.; YAO, J.-C. Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-edm. *Precision Engineering*, v. 31, n. 2, p. 122–129, 2007. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635906000596>>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 13 e 14.

CUNHA, D. F. Influência da utilização do fluido de corte com adição de grafeno na temperatura de usinagem e formação de rebarba no processo de micro fresamento. Universidade Federal de Uberlândia, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/17632>>. Citado na página 43.

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. ISSN 1005-0302. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030212601157>>. Citado na página 9.

DAVIS, J.; COMMITTEE, A. I. H. *Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. ASM International, 2000. (ASM Handbooks Series). ISBN 9780871706850. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=15BUAAAAMAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas ix, 2 e 7.

De Cristofaro, S.; FUNARO, N.; FERITI, G.; ROSTAGNO, M.; COMOGLIO, M.; MERLO, A.; STEFANINI, C.; DARIO, P. High-speed micro-milling: Novel coatings for tool wear reduction. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 63, p. 16–20, 2012. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695512001356>>. Citado na página 1.

EZUGWU, E. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 12, p. 1353–1367, 2005. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505000544>>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 6 e 8.

EZUGWU, E.; BONNEY, J.; FADARE, D.; SALES, W. Machining of nickel-base, inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 162-163, p. 609–614, 2005. ISSN 0924-0136. AMPT/AMME05. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605002426>>. Citado na página 8.

EZUGWU, E.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 134, n. 2, p. 233–253, 2003. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602010427>>. Citado na página 6.

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*, v. 34, n. 6, p. 209–219, 2021. ISSN 1000-9361. High Efficiency and Precision Manufacturing Technology. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936120304532>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 41.

GILLESPIE, L. Deburring precision miniature parts. *Precision Engineering*, v. 1, n. 4, p. 189–198, 1979. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0141635979900990>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

GILLESPIE, L. *Deburring and Edge Finishing Handbook*. Society of Manufacturing Engineers, 1999. ISBN 9780872635012. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=gdq6qajigqoC>>. Citado 4 vezes nas páginas vi, 12, 13 e 17.

GUELI, M.; MA, J.; COCOCETTA, N.; PEARL, D.; JAHAN, M. Experimental investigation into tool wear, cutting forces, and resulting surface finish during dry and flood coolant slot milling of inconel 718. *Procedia Manufacturing*, v. 53, p. 236–245, 2021. ISSN 2351-9789. 49th SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC 49, 2021). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978921000305>>. Citado na página 2.

HASHIMURA, M.; HASSAMONTR, J.; DORNFELD, D. Effect of in-plane exit angle and rake angles on burr height and thickness in face milling operation. 1999. Citado na página 15.

HUO, D.; CHENG, K. Micro cutting mechanics. In: _____. *Micro-Cutting*. John Wiley Sons, Ltd, 2013. cap. 2, p. 19–44. ISBN 9781118536605. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118536605.ch2>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 11.

JAIN, V. K. Editorial by vk jain, iit kanpur (india) for the special issue on “micromanufacturing”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer Nature BV, v. 76, n. 1-4, p. 1–3, 2015. Citado na página 9.

JAYANTI, S.; MAVULETI, K.; BECKER, B.; ERICKSON, E.; WADELL, J.; MARUSICH, T. D.; USUI, S.; MARUSICH, K. Modeling of cutting forces and cycle times for micromachined components. *Procedia CIRP*, v. 1, p. 138–143, 2012. ISSN 2212-8271. Fifth CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112000248>>. Citado na página 9.

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. ISSN 2351-9789. 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 3 vezes nas páginas vi, 12 e 13.

LEE, K.; STIRN, B.; DORNFELD, D. Burr formation in micro-machining aluminum, 6061-t6. In: _____. [S.l.: s.n.], 2002. p. 47–51. ISBN 0-7923-7414-2. Citado 4 vezes nas páginas vi, 16, 17 e 22.

LIAO, L.; XI, F. J.; LIU, K. Modeling and control of automated polishing/deburring process using a dual-purpose compliant toolhead. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 48, n. 12, p. 1454–1463, 2008. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695508000801>>. Citado na página 18.

LIU, D.; WANG, G.; YU, J.; RONG, Y. K. Molecular dynamics simulation on formation mechanism of grain boundary steps in micro-cutting of polycrystalline copper. *Computational Materials Science*, v. 126, p. 418–425, 2017. ISSN 0927-0256. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025616304931>>. Citado na página 10.

LIU, K.; MELKOTE, S. N. Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 49, n. 5, p. 650–660, 2007. ISSN 0020-7403. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740306002116>>. Citado na página 10.

MARINESCU; ROWE; DIMITROV; BORIS; INASAKI, I. Tribology of abrasive machining processes. In: . [S.l.: s.n.], 2004. Citado 9 vezes nas páginas vi, vii, ix, 18, 19, 20, 21, 22 e 47.

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. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695513000898>>. Citado 5 vezes nas páginas vii, 22, 23, 24 e 25.

Minitech Machinery Corporation®. *CNC Mini-Mill/GX Specifications*. 2022. Disponível em: <[https://www.minitech.com/gx---specifications.html#/>](https://www.minitech.com/gx---specifications.html#/). Acesso em: 18 de maio de 2022. Citado na página 27.

Mitsubishi. *Solid End Mills*. 2022. Disponível em: <https://www.mitsubishicarbide.net/mhg/enuk/solid_end_mills/10000222/20060775>. Acesso em: 22 de abril de 2022. Citado 2 vezes nas páginas vii e 27.

NAKANISHI. *Brushless Motor*. 2022. Disponível em: <https://www.nsk-nakanishi.co.jp/industrial-eng/download/manual/sale/OM-K0482E_002_EM-3060_150417.pdf>. Acesso em: 18 de maio de 2022. Citado na página 27.

OLIVEIRA, D. d. Efeito escala e integridade superficial no microfresamento da liga de níquel inconel 718. Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Citado 6 vezes nas páginas vi, vii, ix, 3, 26 e 28.

OLVERA, O.; BARROW, G. An experimental study of burr formation in square shoulder face milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 36, n. 9, p. 1005–1020, 1996. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0890695596000144>>. Citado na página 11.

RAHMAN, M.; SEAH, W.; TEO, T. The machinability of inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 63, n. 1, p. 199–204, 1997. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013696026246>>. Citado na página 6.

REED, R. C. *Introduction*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006. 1–32 p. Citado 7 vezes nas páginas vi, ix, 2, 5, 6, 26 e 27.

SAPTAJI, K.; SUBBIAH, S.; DHUPIA, J. S. Effect of side edge angle and effective rake angle on top burrs in micro-milling. *Precision Engineering*, v. 36, n. 3, p. 444–450, 2012. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635912000396>>. Citado na página 15.

SILVA, G. d. P. Influência das rebarbas e métodos de rebarbação na medição de desgaste em microcanais de inconel 718. Universidade de Brasília, 2021. Citado 6 vezes nas páginas viii, 30, 37, 41, 45 e 46.

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. ISSN 1872-2040. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872204016609209>>. Citado na página 2.

TAKACS, M.; VERÖ, B.; MESZAROS, I. Micromilling of metallic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 138, n. 1-3, p. 152–155, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.

ThyssenKrupp. *Stainless steel melting points*. 2022. Disponível em: <<https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-melting-points.html>>. Acesso em: 02 de março de 2022. Citado 2 vezes nas páginas ix e 7.

UNIST. *Safety Data Sheet - Coolube® 2210*. 2022. Disponível em: <https://unist.com/uploads/SDS/SDS_Coolube_2210.pdf>. Acesso em: 18 de maio de 2022. Citado na página 27.

VAZQUEZ, E.; AMARO, A.; CIURANA, J.; RODRÍGUEZ, C. A. Process planning considerations for micromilling of mould cavities used in ultrasonic moulding technology. *Precision Engineering*, v. 39, p. 252–260, 2015. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635914001056>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.

WECK, M.; FISCHER, S.; VOS, M. Fabrication of microcomponents using ultraprecision machine tools. *Nanotechnology*, IOP Publishing, v. 8, n. 3, p. 145–148, sep 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0957-4484/8/3/007>>. Citado na página 1.

WEULE, H.; HUNTRUP, V.; TRITSCHLER, H. Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization. *CIRP Annals*, v. 50, n. 1, p. 61–64, 2001. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060762071X>>. Citado na página 1.

WOON, K.; RAHMAN, M.; FANG, F.; NEO, K.; LIU, K. Investigations of tool edge radius effect in micromachining: A fem simulation approach. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 195, n. 1, p. 204–211, 2008. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607005031>>. Citado na página 1.

YADAV, A. K.; KUMAR, M.; BAJPAI, V.; SINGH, N. K.; SINGH, R. K. Fe modeling of burr size in high- speed micro-milling of ti6al4v. *Precision Engineering*, v. 49, p. 287–292, 2017. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635916303609>>. Citado na página 3.

ZIBEROV, M. Microfresamento da liga ti-6al-4v com microferramentas com diferentes revestimentos e aplicação de mql. Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26746>>. Citado 5 vezes nas páginas vi, 1, 2, 15 e 41.

A CONEM 2022

Artigo submetido ao Congresso nacional de Engenharia Mecânica (CONEM) 2022.

FORMAÇÃO DE REBARBAS NO MICROFRESAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Geovanna Diniz Mendonça, geovannamendonca.d@gmail.com¹
Marcelo Lopes de Araújo, marcelo.lps.araujo@gmail.com¹
Deborah de Oliveira, oliveira.deborah@unb.br¹

¹Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, CEP 70910900.

Resumo: *As ligas de alumínio possuem diversas aplicações industriais, principalmente devido à sua baixa densidade elevada resistência à corrosão. Estas ligas, no entanto, apesar de terem pouca resistência mecânica, podem ser desafiadores durante a usinagem devido às grandes deformações que podem ocorrer associadas a sua alta ductilidade. Este problema é agravado quando se consideram peças pequenas, com características micrométricas, como no caso da microusinagem. A microusinagem é um conjunto de processos de usinagem caracterizado por utilizar ferramentas de corte com dimensões inferiores a 1000 µm. Este processo tem ainda como característica a dificuldade na formação de cavacos, uma vez que as ferramentas de microusinagem não podem ser consideradas perfeitamente afiadas e seu grande raio de ponta faz com que a usinagem seja predominantemente negativa, o que resulta em muito ploughing e deformações plásticas sem remoção de material. Percebe-se então que a microusinagem de ligas de alumínio pode não ser trivial, uma vez que o principal fator que pode dificultar o microfresamento dessas ligas é sua alta ductilidade, que faz com que as peças apresentem maior tendência ao ploughing, bem como rebarbas de grandes dimensões, podendo inclusive possuir dimensões superiores à característica geométrica que foi usinada na peça. Além disso, devido aos tamanhos reduzidos, a microusinagem é um processo que não permite que a rebarbação seja feita de forma simples, como nos processos macro. Assim, considerando que a microusinagem, mais especificamente o processo de microfresamento, é relativamente recente, e que o microfresamento de ligas de alumínio pode ser dificultado pela presença de grandes rebarbas, este trabalho tem como objetivo fazer um levantamento bibliográfico sobre os resultados obtidos em microfresamento de ligas de alumínio com foco nas rebarbas e com a análise da literatura, espera-se identificar parâmetros de corte que favorecem a fabricação de peças com menores rebarbas. Por fim, espera-se poder compilar um conjunto de características de microfresamento, de forma a contribuir para a fabricação de micropeças de alumínio com redução nas rebarbas.*

Palavras-chave: *Microusinagem, Microfresamento, Alumínio, Rebarbas.*

1. INTRODUÇÃO

Os processos de microusinagem vem ganhando destaque devido à crescente necessidade de miniaturização de alguns componentes amplamente utilizados em diversas áreas, como: eletrônicas, biotecnológica, automotiva, médica, dentre outras (Ziberov, 2020; Cheng; Huo, 2013). A microusinagem é definida por Camara et. al. (2012), como um processo que emprega ferramentas de corte cujas dimensões variam de 1 µm a 1000 µm.

O processo micro se difere do processo de usinagem macro, devido ao chamado efeito escala, que acontece devido ao raio da aresta de corte da ferramenta ser semelhante, em tamanho, à espessura de corte. Esse efeito provoca um aumento não linear na energia específica de corte, em outras palavras, é o aumento da energia, por unidade de volume, de material removido, em função da redução da espessura de corte (Chae et. al., 2006). O efeito escala também é responsável pelo efeito *ploughing*, que é provocado pelo ângulo de saída negativo da ferramenta de corte, que causa a deformação do material nos arredores da aresta de corte. Esse efeito é responsável por provocar uma deformação plástica e/ou elástica do material (Bissaco et. al., 2005).

A formação de rebarbas nos processos de microusinagem são, proporcionalmente, muito maiores, se comparadas com as rebarbas do processo convencional. Apesar de dimensionalmente menores, elas podem afetar diretamente a qualidade superficial da peça usinada e, afetar o processo de montagem da peça. Além disso, o processo de remoção de rebarbas de dimensões micro, se torna muito mais complexo (Lekkala, 2011). Segundo Oliveira (2019), no microfresamento, as rebarbas podem ter dimensões maiores que a profundidade de corte do processo. Em ligas de alta ductilidade, como é o caso do alumínio, a formação de rebarbas pode se tornar ainda mais crítica. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre a formação de rebarbas no microfresamento de ligas de alumínio.