

**LETICIA CRISTINA SILVA**

**MICROFRESAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL 316L  
OBTIDO POR FUSÃO SELETIVA A LASER (SLM)  
UTILIZANDO FERRAMENTAS DE METAL DURO  
COM DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2022

**LETICIA CRISTINA SILVA**

**MICROFRESAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL 316L  
OBTIDO POR FUSÃO SELETIVA A LASER (SLM)  
UTILIZANDO FERRAMENTAS DE METAL DURO COM  
DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTOS**

**Tese** apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Doutora em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva.

**Uberlândia – MG**

**2022**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 Silva, Leticia Cristina, 1982-  
2022 Microfresamento do aço inoxidável 316L obtido por fusão seletiva a laser (SLM) utilizando ferramentas de metal duro com diferentes tipos de revestimentos [recurso eletrônico] : / Leticia Cristina Silva. - 2022.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.240>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 324, COPEM				
Data:	31/05/2022	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	18:30
Matrícula do Discente:	11723EMC015				
Nome do Discente:	Letícia Cristina Silva				
Título do Trabalho:	Microfresamento do Aço Inoxidável 316L obtido por Fusão Seletiva a Laser (SLM) utilizando Ferramentas de Metal Duro com Diferentes Revestimentos				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	"Microusinagem de Materiais Avançados"				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU; Washington Martins da Silva Júnior - FEMEC/UFU; Lincoln Cardoso Brandão - UFSJ; João Roberto Ferreira - UNIFEI; e Márcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU, orientador da candidata. Ressalta-se que os Prof. Rosemar Batista da Silva, Washington Martins da Silva Júnior, Márcio Bacci da Silva e a Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG; Lincoln Cardoso Brandão desde a cidade de São João Del-Rei/MG e João Roberto Ferreira desde a cidade de Itajubá/MG, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Márcio Bacci da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.



Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Membro de Comissão**, em 31/05/2022, às 18:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/05/2022, às 18:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/05/2022, às 18:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lincoln Cardoso Brandão, Usuário Externo**, em 31/05/2022, às 18:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Roberto Ferreira, Usuário Externo**, em 31/05/2022, às 19:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3600130** e o código CRC **5A21008F**.

# DEDICATÓRIA

Ao meu filho Matheus, por redefinir meus conceitos de resiliência, limitação e superação.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem o qual nada sou e nada posso.

A toda minha família e amigos, em especial aos meus pais Elaine e José Divino, aos meus irmãos Leandro e Larissa, meu afilhado Bernardo e às minhas amigas Daniela e Ana Paula. Sem o amor, apoio e compreensão de vocês eu não teria suportado todas as dificuldades.

Ao meu esposo Vitor pela compreensão nos muitos momentos de ausência, pelo apoio diário e pelos detalhes rotineiros que fizeram toda a diferença. Ao nosso filho Matheus, que preencheu nossos dias de alegria e que já nos ensina muitas lições, muito antes de nascer.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva, minha sincera gratidão pela orientação, paciência e disponibilidade, fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Wayne Hung da Texas A&M University dos Estados Unidos, pela doação das amostras.

Aos demais professores da pós-graduação, que tanto me ensinaram e me tornaram uma pessoa melhor.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade concedida.

À CAPES, CNPq e, principalmente, à FAPEMIG pelo essencial apoio financeiro.

A todos os colegas de pós-graduação, em especial aos que conviveram diariamente e presencialmente (no período pré pandemia), Dr. Maksym Ziberov, Me. Walter Motta, Dra. Aline Gonçalves, Dr. Ivanilson Costa, Me. Phillipe, Me. Carlos Damião, Dra. Déborah Oliveira, Me. Milla Gomes e Eng. Giordano Vieira.

Aos técnicos de laboratório: Lazaro Henrique, Thiago Pereira, Thiago Menezes, Dr. Alcione dos Reis e especialmente ao Me. Rafael Heilbuth pelo apoio eficiente e despretensioso.

Aos laboratórios: Laboratório de Microusinagem, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) pelo apoio técnico e laboratorial.

Por fim, agradeço em geral a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a minha formação pessoal, profissional e acadêmica.

# SUMÁRIO

1.	CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	Considerações iniciais .....	1
1.2.	Objetivo Geral .....	4
1.3.	Objetivos Específicos .....	4
1.4.	Justificativa .....	5
1.5.	Estruturação do trabalho .....	5
2.	CAPÍTULO II – REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1.	Manufatura aditiva de metais.....	7
2.2.	Fusão seletiva a <i>laser</i> (SLM) .....	11
2.3.	Estratégias de varredura no processo SLM .....	15
2.4.	Microusinagem .....	17
2.5.	Formação de rebarba .....	21
2.6.	Desgaste da ferramenta .....	26
2.7.	Influência do revestimento no desgaste da ferramenta.....	30
2.8.	Qualidade superficial e rugosidade.....	32
2.9.	Aço inoxidável 316L .....	35
2.10.	Microusinagem de peças fabricadas por manufatura aditiva.....	38
3.	CAPÍTULO III - METODOLOGIA.....	45
3.1.	Caracterização do material .....	45
3.2.	Fixação e preparação das amostras.....	52
3.3.	Caracterização das ferramentas.....	54
3.4.	Realização dos experimentos.....	57
3.5.	Análise das variáveis de saída .....	59
3.5.1.	Desgaste das ferramentas.....	59
3.5.2.	Qualidade Superficial.....	60
3.5.3.	Formação de rebarba .....	63
3.5.4.	Formação de Cavaco .....	65
4.	CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	67
4.1.	Desgaste de Ferramenta .....	67
4.1.1.	Evolução do desgaste .....	67
4.1.2.	Formas e Mecanismos de Desgaste da Ferramenta.....	79
4.2.	Qualidade Superficial.....	90

4.2.1. Rugosidade .....	91
4.2.2. Superfície Microusinada .....	98
4.3. Formação de Rebarbas .....	113
4.4. Formação de cavacos .....	124
4.5. Análise geral.....	131
5. CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS....	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138

SILVA, L. C. **Microfresamento do Aço Inoxidável 316L Obtido por Fusão Seletiva a Laser (SLM) Utilizando Ferramentas de Metal Duro com Diferentes Tipos de Revestimentos.** 2022. 155 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

## RESUMO

A manufatura aditiva de metais (MAM) é uma tecnologia em plena ascensão, considerada promissora por sua capacidade de produzir geometrias complexas, com menos restrições geométricas. No entanto, os defeitos inerentes a MAM influenciam diretamente a microestrutura e as propriedades mecânicas da peça impressa, além da necessidade de técnicas de pós-processamento subtrativas, quando requeridas tolerâncias dimensionais, geométricas e de acabamento superficial. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo investigar a usinabilidade do aço inoxidável ABNT 316L obtido pelo processo de fusão seletiva a *laser* (SLM) através da comparação do desempenho de microfresas sem revestimento e com os revestimentos: AlCrN, DLC, TiN e TiAlN. Para tanto, foram realizados ensaios que consistiram na usinagem de microcanais, em dois tipos diferentes de amostras impressas utilizando duas técnicas diferentes de varredura do laser. A partir dos dados experimentais, foram analisados a evolução do desgaste, as formas e mecanismos de desgaste da ferramenta, as rugosidades ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ), a superfície microusinada, aspectos quantitativos e qualitativos da formação de rebarbas e cavacos. Os resultados mostram que os maiores desgastes foram obtidos com as ferramentas sem revestimento e com revestimento DLC. A aplicação de fluido de corte não promoveu melhoria significativa na redução dos desgastes. O arredondamento do raio de ponta e o desgaste de flanco são as formas de desgaste predominantes nas microferramentas, provocados principalmente pelo mecanismo de “adesão e arrastamento”. As menores rugosidade foram obtidas com a utilização de ferramentas sem revestimento e em geral favorecidas pela estrutura da amostra denominada Bloco S e a utilização de MQL. As superfícies usinadas resultantes foram classificadas em cinco diferentes tipos, além da observação de poros e cavidades internas localizadas nas extremidades dos canais. O volume de rebarbas obtido é menor que o observado na usinagem de metais convencionais e predominantemente maior do lado discordante, sendo agravado quando usinado a seco. Foram identificados cavacos do tipo contínuo, com formas de fita ou helicoidal e alto grau de recalque do cavaco. Por fim, os melhores desempenhos foram obtidos pelas ferramentas com revestimento TiAlN e AlCrN, quando usinado o bloco S e pelas ferramentas sem revestimento, quando usinado o bloco C.

O melhor desempenho geral foi obtido pela microferramenta com revestimento TiAlN na usinagem do bloco S, sem a utilização de fluido de corte.

---

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Fusão seletiva a laser; Microfresamento; Aço Inoxidável 316L; MQL.

SILVA, L. C. **316L Stainless Steel Micromilling Made by Selective Laser Melting (SLM) Using Carbide Tools with Different Types of Coatings**. 2022. 155 p. Ph.D. Thesis, Federal University of Uberlandia, Uberlandia-MG.

## ABSTRACT

Additive metal manufacturing (MAM) is a technology on the rise, considered promising for its ability to produce complex geometries, with fewer geometric restrictions. However, defects inherent to MAM directly influence the microstructure and mechanical properties of the printed part, in addition to the need for subtractive post-processing techniques, when dimensional, geometric and surface finish tolerances are required. In this context, this work aims to investigate the machinability of stainless steel ABNT 316L obtained by the selective laser melting (SLM) process by comparing the performance of micromills without coating and with coatings: AlCrN, DLC, TiN and TiAlN. To this end, tests were performed that consisted of machining microchannels, in two different types of printed samples using two different laser scanning techniques. From the experimental data, the evolution of wear, the shapes and mechanisms of tool wear, the roughness (Ra, Rq, Rz, Rt, Rsk, Rku), the micromachined surface, quantitative and qualitative aspects of burr formation were analyzed. and chips. The results show that the highest wear was obtained with the uncoated and DLC coated tools. The application of cutting fluid did not promote significant improvement in the reduction of wear. Rounding of the nose radius and flank wear are the predominant forms of wear in microtools, caused mainly by the adhesion and drag mechanism. The lowest roughness was obtained with the use of uncoated tools and in general favored by the structure of the sample called Block S and the use of MQL. The resulting machined surfaces were classified into five different types, in addition to the observation of pores and internal cavities located at the ends of the channels. The volume of burrs obtained is smaller than that observed in the machining of conventional metals and predominantly greater on the up-milling side, being aggravated when machined dry. Continuous type chips were identified, with ribbon or helical shapes and a high degree of chip settlement. Finally, the best performances were obtained by tools with TiAlN and AlCrN coatings, when the S-block was machined, and by the uncoated tools, when the C-block was machined. The best overall performance was obtained by the microtool with TiAlN coating when machining the S-block, without using cutting fluid.

---

Keywords: Additive manufacturing; Selective laser fusion; Micro-machining; Stainless Steel 316L; MQL.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplos da utilização de microusinagem (Adaptado de MONDRAGON UNIBERTSITATEA, 2018). .....	2
Figura 1.2 - Exemplos da utilização de microusinagem (KERN, 2018). .....	3
Figura 2.1 - As 7 famílias da manufatura aditiva (adaptado de HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES, 2022). .....	9
Figura 2.2 - Esquema de fabricação de uma peça por SLM (adaptado de OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015). .....	12
Figura 2.3 - (a) Densidade do material a granel fundido a laser (b) Rugosidade média da superfície do material a granel fundido a laser (adaptado de SEYDA; KAUFMANN; EMMELMANN, 2012). .....	13
Figura 2.4 - Imperfeições no microfresamento da superliga Inconel 718 SLM (adaptado de SADIQ, et al. 2018). .....	14
Figura 2.5 - Esquema ilustrativo das estratégias de varredura a laser usadas para a fabricação de amostras 316L SS (Adaptado de MARATTUKALAM et al., 2020). .....	16
Figura 2.6 - Estratégias de varredura: (a) linear, (b) zigue-zague, (c) tabuleiro de xadrez e (d) espiral (Adaptado de RIBEIRO, MARIANI e COELHO, 2020). .....	17
Figura 2.7 - Esquema da aresta de corte em (a) corte em microescala e (b) macroescala convencional (Adaptado de BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005; ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009). .....	18
Figura 2.8 - Mecanismos de remoção de material na microusinagem (Adaptado de ARAMCHAROEN; MANTIVENGA, 2009). .....	18
Figura 2.9 - Cavaco “quasi-shear-extrusion” com camadas alternadas de perlita e ferrita, em (a) imagem simulação FE e (b) imagens de seções transversais de cavacos obtidas em MEV (adaptado SIMONEAU, NG e ELBESTAWI, 2006). .....	20
Figura 2.10 - (a) Cavaco segmentado obtido através de experimento e (b) Simulação de todo processo de formação de cavacos (adaptado WANG et al., 2009). .....	21
Figura 2.11 - Classificação de Rebarbas (adaptado de GILLESPIE, 1976). .....	22
Figura 2.12 - Classificação de Rebarbas (adaptado de CHERN, 1993; LIN, 1999). .....	22
Figura 2.13 - Classificação de Rebarbas (adaptado de HASHIMURA, CHANG e DORNFELD, 1999; LEE e DORNFELD, 2002; KISWANTO, ZARIATIN e KO, 2014). .....	23
Figura 2.14 - Classificação de Rebarbas (adaptado de CHERN et al. 2007). .....	24
Figura 2.15 - Variação da rebarba em função da combinação $v_c \times f_z$ (adaptado de FILIZ et al. 2007). .....	24

Figura 2.16 - Utilização de adesivo instantâneo. (a) Peça de trabalho após aplicação do adesivo, (b) separação da peça usinada do adesivo, (c) imagem do canal ainda com o adesivo e (d) imagem do canal sem o adesivo (adaptado de KOU et al. 2015). .....	26
Figura 2.17 - Vida da ferramenta sem revestimento no microfresamento em condições de corte com MQL e seco (adaptado de ZIBEROV et al., 2016).....	28
Figura 2.18 - Ferramenta reconstruída por EDoF (a) Ferramenta nova, (b) Ferramenta usada, (c) Mudança na intensidade da luz, (d) Segmentação da área de desgaste, (e) Área de desgaste na superfície de saída (adaptado de SZYDLOWSKI et al. 2016).....	28
Figura 2.19 - Medição e estimativa da área de desgaste (a) Medição direta através de imagens 2D, (b) Algoritmo tradicional, (c) Novo algoritmo baseado em MCA (adaptado de ZHU e HU, 2017). .....	29
Figura 2.20 - Largura do desgaste da ferramenta e progressão da área com o tempo (adaptado de ZHU e HU, 2017). .....	29
Figura 2.21 - Comparação dos revestimentos em função da vida útil da ferramenta (ARAMCHAROEN et al. 2008; adaptado de ZIBEROV, 2018).....	30
Figura 2.22 - Comparação do desgaste de flanco de ferramentas com novos revestimentos, comparados com revestimentos disponíveis comercialmente (Adaptado de CRISTOFARO et al., 2012). .....	31
Figura 2.23 - Influência do avanço e velocidade de corte no microfresamento, utilizando ferramenta de metal duro (Adaptado de CHENG; HUO, 2013). .....	33
Figura 2.24 - Influência da velocidade de corte e da dureza do material na rugosidade superficial (Adaptado de WEULE; HUNTRUP; TRITSCHLER, 2001). .....	34
Figura 2.25 - Comparação dos valores de Ra com a utilização de MQL e a Seco (Adaptado de ZIBEROV, 2018).....	35
Figura 2.26 - Influencia da Densidade de energia, em (a) em função da porosidade (b) em função da dureza (Adaptado de TUCHO et al. 2018).....	38
Figura 2.27 - Rugosidade e Altura da rebarba de topo (Adaptado de DE OLIVEIRA CAMPOS et al. 2018).....	40
Figura 2.28 - Gráficos de parâmetros de rugosidade Rp, Rv, Rz, Rsk and Rku (Adaptado de DE ASSIS et al. 2020). .....	41
Figura 3.1 - Estratégias de impressão, em (a) Stripe; (b) Chess. ....	46
Figura 3.2 - Composição química bloco S.....	47
Figura 3.3 - Composição química bloco C. ....	48
Figura 3.4 - Microestrutura amostras, em (a) Topo Bloco S e (b) Topo Bloco C. ....	48
Figura 3.5 - Microestrutura amostras, em (a) Lateral Bloco S e (b) Lateral bloco C. ....	49

Figura 3.6 - Microestrutura do aço inoxidável 316L, obtido através de processo convencional de fabricação (GOMES, 2019).....	49
Figura 3.7 - Imperfeições das amostras obtidas através processo de fabricação SLM, em (a) superfície rugosa devido a fusão parcial do pó, (b) trincas e (c) cavidade em superfície seccionada pelo microfresamento. ....	50
Figura 3.8 - Microestrutura lateral das amostras, em (a) Bloco S; (b) Bloco C. ....	51
Figura 3.9 - Porosidade no bloco C.....	51
Figura 3.10 - Metodologia de fixação das amostras (adaptado de OLIVEIRA, 2019).....	52
Figura 3.11 - Fixação da amostra e preparação para microusinagem.....	53
Figura 3.12 - Verificação do nivelamento da superfície.....	54
Figura 3.13 - Parâmetros geométricos e detalhes das microfresas (Adaptado de PERFORMANCE MICRO TOOLS, 2012). ....	55
Figura 3.14 - Ferramenta nova de metal duro com revestimento de TiAlN: (a) detalhe da aresta danificada; (b) projeção da aresta considerada ideal; (c) imagem da superfície de saída da aresta danificada. ....	56
Figura 3.15 - Características típicas das microfresas utilizadas. ....	56
Figura 3.16 - Posicionamento do bocal em relação a microfresa. ....	59
Figura 3.17 - Exemplo da medição de desgaste, em (a) medição do diâmetro na ferramenta nova, (b) medição do diâmetro na ferramenta desgastada, (c) detalhe da diferença entre o diâmetro da ferramenta desgastada e o perfil da ferramenta nova traçada anteriormente. ....	60
Figura 3.18 - Detalhes do Perfilômetro Form Talysurf Intra 2.....	61
Figura 3.19 - Detalhe da medição da rugosidade e obtenção do perfil da superfície. ....	62
Figura 3.20 - Medição do comprimento da rebarba de topo, em (a) lado discordante, (b) imagem do canal microusinado e (c) lado concordante. ....	64
Figura 3.21 - Detalhes da medição do comprimento da rebarba de topo, em (a) o comprimento real da rebarba e em (b) comprimento medido de acordo com a metodologia.....	65
Figura 4.1 - Evolução do desgaste das ferramentas na usinagem do Bloco S, na condição a seco.68	
Figura 4.2 - Imagens de topo das ferramentas novas, após 10 mm e após 70 mm usinados, Bloco S, na condição a seco.....	69
Figura 4.3 - Evolução do desgaste das ferramentas na usinagem do Bloco C, na condição a seco.71	
Figura 4.4 - Imagens de topo das ferramentas novas, após 10 mm e após 70 mm usinados, Bloco C, na condição a seco.....	72
Figura 4.5 - Evolução do desgaste das ferramentas na usinagem do Bloco S, com MQL....	74

Figura 4.6	Imagens de topo das ferramentas novas, após 10 mm e após 70 mm usinados, Bloco S, utilizando MQL.....	75
Figura 4.7	- Evolução do desgaste das ferramentas na usinagem do Bloco C, com MQL. ..	76
Figura 4.8	- Imagens de topo das ferramentas novas, após 10 mm e após 70 mm usinados, Bloco C, utilizando MQL. ....	77
Figura 4.9	- Medição e arredondamento do raio de ponta, em (a) Ferramenta Nova; (b) Ferramenta com revestimento TiN; (c) Ferramenta com revestimento TiNAl e (d) Ferramenta com revestimento AlCrN.....	80
Figura 4.10	- Desgaste de flanco nos diferentes tipos de ferramentas, em (a) sem revestimento a seco; (b) sem revestimento, MQL; (c) DLC a seco; (d) DLC, MQL; (e) AlCrN a seco; (f) AlCrN, MQL; (g) TiN a seco; (h) TiN, MQL; (i) TiNAl a seco; (j) TiNAl, MQL. ....	81
Figura 4.11	- Desgaste de flanco na superfície secundária de folga, em (a) usinagem a seco e (b) usinagem utilizando MQL. ....	82
Figura 4.12	- Presença de material aderido na superfície de saída de ferramentas com revestimento, em (a) TiN, 30 mm usinados, bloco S a seco; (b) TiNAl, 50 mm usinados, bloco C a seco; (c) AlCrN, 70 mm usinados, bloco C a seco; (d) DLC, 70 mm usinados, bloco C com MQL. ....	84
Figura 4.13	- Cavacos aderidos a ferramentas sem revestimento, em (a) EDS realizado superfície principal de folga; (b) EDS realizado superfície de saída.....	85
Figura 4.14	- Evidencia de lascamento em várias arestas de corte de ferramentas sem revestimento, após a usinagem de 70 mm.....	86
Figura 4.15	- Perda de coesão do revestimento DLC no substrato de metal duro, em (a) ampliação da superfície de saída; (b) ampliação da ponta da ferramenta. ....	88
Figura 4.16	- EDS realizado em ferramenta revestida com DLC.....	89
Figura 4.17	- Média das rugosidades Ra e Rq, em (a) Bloco S, Seco; (b) Bloco S, MQL; (c) Bloco C, Seco; (d) Bloco C, MQL.....	92
Figura 4.18	- Média das rugosidades Rt e Rz, em (a) Bloco S, Seco; (b) Bloco S, MQL; (c) Bloco C, Seco; (d) Bloco C, MQL.....	95
Figura 4.19	- Média das rugosidades Rsk e Rku, em (a) Bloco S, Seco; (b) Bloco S, MQL; (c) Bloco C, Seco; (d) Bloco C, MQL.....	97
Figura 4.20	- Superfícies usinadas Tipo 1, em (a) Ferramenta sem revestimento, Bloco S, MQL; (b) Ferramenta sem revestimento, Bloco C, MQL; (c) Ferramenta com revestimento DLC, Bloco C, MQL. ....	99
Figura 4.21	- Superfícies usinadas Tipo 2, utilizando ferramentas com revestimento DLC, em (a) Bloco S, seco; (b) Bloco C, seco; (c) Bloco S, MQL; Bloco C, MQL.....	100

Figura 4.22 - Superfícies Tipo 3, usinadas no Bloco S na condição a seco, em (a) Ferramenta sem revestimento; (b) Ferramenta revestimento DLC.....	101
Figura 4.23 - Superfícies usinadas Tipo 4, em (a) Bloco C, Ferramenta TiN, MQL; (b) Bloco C, Ferramenta TiNAl, MQL; (c) Bloco S, Ferramenta TiNAl, seco; (d) Bloco C, Ferramenta DLC, MQL.....	102
Figura 4.24 - Superfície usinada Tipo 5, em (a) ilustração explicativa do depósito de APC na superfície usinada (Adaptado de WANG, et al. 2016) e em (b) superfície do Bloco C, Ferramenta AlCrN, MQL.....	103
Figura 4.25 - Resumo das principais superfícies identificadas em cada condição de corte.	104
Figura 4.26 - Medição das marcas de avanço e possível fenômeno chatter, em (a) Bloco S, sem revestimento, MQL; (b) Bloco C, revestimento DLC, MQL; (c) Bloco C, revestimento TiNAl, MQL e (d) Bloco S, revestimento DLC, seco.....	105
Figura 4.27 - Poros microusinados, em (a) Bloco S, ferramenta sem revestimento, MQL; (b) e (c) Bloco C, ferramenta TiNAl, MQL; (d) Bloco C, ferramenta TiN, MQL; (e) Bloco S, ferramenta DLC, seco.....	107
Figura 4.28 - Poro microusinado e perfil de rugosidade.....	108
Figura 4.29 - Cavidades internas na superfície microusinada.....	109
Figura 4.30 - Grande cavidade interna localizada na lateral do canal.....	110
Figura 4.31 - Defeitos internos concentrados nas extremidades dos canais realizados no Bloco C, em (a) canal íntegro; (b) ferramenta TiAlN e partículas de pó parcialmente fundidas; (c) ferramenta DLC; (d) a ferramenta AlCrN; (e) ferramenta TiN.....	111
Figura 4.32 - Defeitos internos concentrados nas extremidades dos canais realizados no Bloco S, em (a) canal íntegro; (b) ferramenta DLC; (c) ferramenta AlCrN e (d) ferramenta TiAlN.	112
Figura 4.33 - Exemplos da formação de rebarbas na entrada e saída das ferramentas nos canais.....	113
Figura 4.34 Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta sem revestimento, Bloco C, a seco.....	114
Figura 4.35 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta sem revestimento, Bloco S, MQL.....	115
Figura 4.36 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta revestimento DLC, Bloco S, a seco.....	115
Figura 4.37 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta revestimento AlCrN, Bloco C, MQL.....	116

Figura 4.38 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta revestimento TiN, Bloco C, MQL. ....	117
Figura 4.39 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta revestimento TiAlN, Bloco S, Seco. ....	117
Figura 4.40 - Rebarbas semelhantes as rebarbas do tipo primária. ....	118
Figura 4.41 - Rebarbas do tipo pena. ....	119
Figura 4.42 - Rebarbas do tipo agulha. ....	120
Figura 4.43 - Rebarbas do tipo menor. ....	121
Figura 4.44 - Rebarba do tipo pena invertida. ....	122
Figura 4.45 - Rebarbas do tipo agulha invertida. ....	122
Figura 4.46 - Comprimento médio das rebarbas, em (a) Bloco S, seco; (b) Bloco S, MQL; (c) Bloco C, seco e (d) Bloco C, MQL. ....	124
Figura 4.47 - Cavacos gerados no microfresamento com as ferramentas revestimento: (a) DLC; (b) TiN; (c) AlCrN e (d) TiAlN. ....	125
Figura 4.48 - Medição das lamelas de um cavaco tipo contínuo. ....	126
Figura 4.49 - Medição de comprimento e largura dos cavacos. ....	127
Figura 4.50 - Cavacos helicoidais observados na usinagem do Bloco C, ferramenta sem revestimento (seco), em (a) ampliação de um cavaco helicoidal. ....	128
Figura 4.51 - Cavaco helicoidal obtido microusinagem ferramenta revestimento AlCrN. ....	129
Figura 4.52 - Medição da espessura dos cavacos. ....	130
Figura 4.53 - Resumo das análises qualitativas. ....	132
Figura 4.54 - Ranking desempenho em função da combinação de análises quantitativas. ....	133

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Composição química do pó de aço inoxidável 316L (RENISHAW, 2018).....	36
Tabela 2.2 - Dados genéricos do 316L forjado (adaptado de RENISHAW, 2018).....	36
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas de componentes 316L fabricados aditivamente (adaptado de RENISHAW, 2018). .....	37
Tabela 3.1 - Composição química do pó de aço inoxidável 316L (RENISHAW, 2018).....	47
Tabela 3.2 - Parâmetros de corte utilizados para preparação das amostras.....	53
Tabela 3.3 - Condições de usinagem utilizadas. ....	58

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

A	Área de corte
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$a_e$	Penetração de trabalho ( $\mu\text{m}$ )
AlCrN	Nitreto de alumínio e cromo
$a_p$	Profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ )
APC	Aresta Postiça de Corte
b	Largura de corte
BJ	Binder Jetting (Jateamento de ligante)
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CrN	Nitreto de cromo
CrTiAlN	Nitreto de cromo, titânio e alumínio
DED	Directed Energy Deposition (Deposição de Energia Direcionada)
DLC	Diamond-like carbono (Carbono como-Diamante)
DMLS	Direct Metal Laser Solidification (Sinterização a laser direta de metal)
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
$F_c$	Força de corte (N)
$f_z$	Avanço por dente (mm/dente)
h	Espessura de cavaco indeformado ( $\mu\text{m}$ )
h'	Espessura do cavaco ( $\mu\text{m}$ )
$h_{\text{min}}$	Espessura mínima para formação de cavaco ( $\mu\text{m}$ )
ISO	International Organization for Standardization
$k_s$	Pressão específica de corte ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
LMM	Laboratório Multiusuário de Microscopia
LTM	Laboratório de Tribologia e Materiais
MA	Manufatura Aditiva
MAM	Manufatura Aditiva de Metais
ME	Material Extrusion
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MJ	Material Jetting (Jateamento de materiais)
MQL	Mínima Quantidade de Fluido
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
Ni	Níquel
nm	Nanometro
PBF	Powder Bed Fusion (Fusão em leito de pó)
$R_a$	Rugosidade aritmética média ( $\mu\text{m}$ )
$R_c$	Grau de recalque do cavaco
$r_\epsilon$	Raio de ponta da microferramenta ( $\mu\text{m}$ )
rpm	Rotação por minuto (rpm)
$R_q$	Desvio médio quadrático ( $\mu\text{m}$ )
$R_{sk}$	Fator de assimetria - Skewness
$R_{ku}$	Fator de achatamento - Kurtosis
$R_t$	Altura total do perfil ( $\mu\text{m}$ )
$R_z$	Altura máxima do perfil ( $\mu\text{m}$ )
SL	Sheet Lamination (Laminação de folha)
SLA	Stereolithography Apparatus (Aparelho de estereolitografia)



SLM	Selective Laser Melting (Fusão Seletiva a Laser)
SLS	Selective Laser Sintering (Sinterização Seletiva a Laser)
TiAlN	Nitreto de titânio e alumínio
TiN	Nitreto de titânio
$\mu\text{m}$	Micrometro
$v_c$	Velocidade de corte (m/min)
$v_f$	Avanço da mesa (mm/min)
VAT	Photo-polymerization (Fotopolimerização)
$\varnothing$	Diâmetro
$\alpha$	Ângulo de folga

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações iniciais

As pesquisas, desenvolvimento e domínio de tecnologias emergentes de miniaturização, são essenciais no atendimento dos requisitos de avanço tecnológico da microusinagem. A expansão dos limites de conhecimento é pressionada cada vez mais pela busca contínua e crescente por produtos cada vez menores e mais confiáveis. Essas tecnologias consideradas incipientes, em função das poucas aplicações práticas e comerciais claramente identificadas, são consideradas potenciais tecnologias-chave do futuro que trarão maneiras completamente diferentes pelas quais as pessoas e as máquinas interagem com o mundo físico (MONDRAGON UNIBERTSITATEA, 2018).

Neste contexto, o microfresamento é considerado uma excelente alternativa para fabricação destes microcomponentes, principalmente por apresentar grande versatilidade entre as diversas operações de usinagem, permitindo o desenvolvimento e a fabricação de uma ampla gama de micro produtos, em vários setores diferentes, como por exemplo os setores aeroespacial, aviônico, automobilístico, biomédico, eletrônico, ótico, telecomunicações, joalheria, relojoaria, entre outros (TAKACS; VERO; MÉSZÁROS, 2003; VENKATESH et al., 2016).

A Figura 1.1 apresenta alguns exemplos, em (a) Colchetes dentários, (b) Ferramentas de remoção de tecidos para endoscopia, (c) Placa base do relógio de gravação, (d) Molde de pingente (joias), (e) Elemento de união para o conector de fibra óptica, (f) Rodas de turbina para bombas microfluídicas, (g) Micromoldes de uma engrenagem planetária, (h) Cavidade de um micromolde, (i) Eletrodo para fabricação de uma locomotiva de brinquedo, (j) Parafuso de ajuste para o micrômetro, (l) Ferramenta modular de inserção de moldes para caixas de moldagem para uma fresa micrométrica acionada hidraulicamente, (m) Suporte de lente de microscópio em miniatura (MONDRAGON UNIBERTSITATEA, 2018).

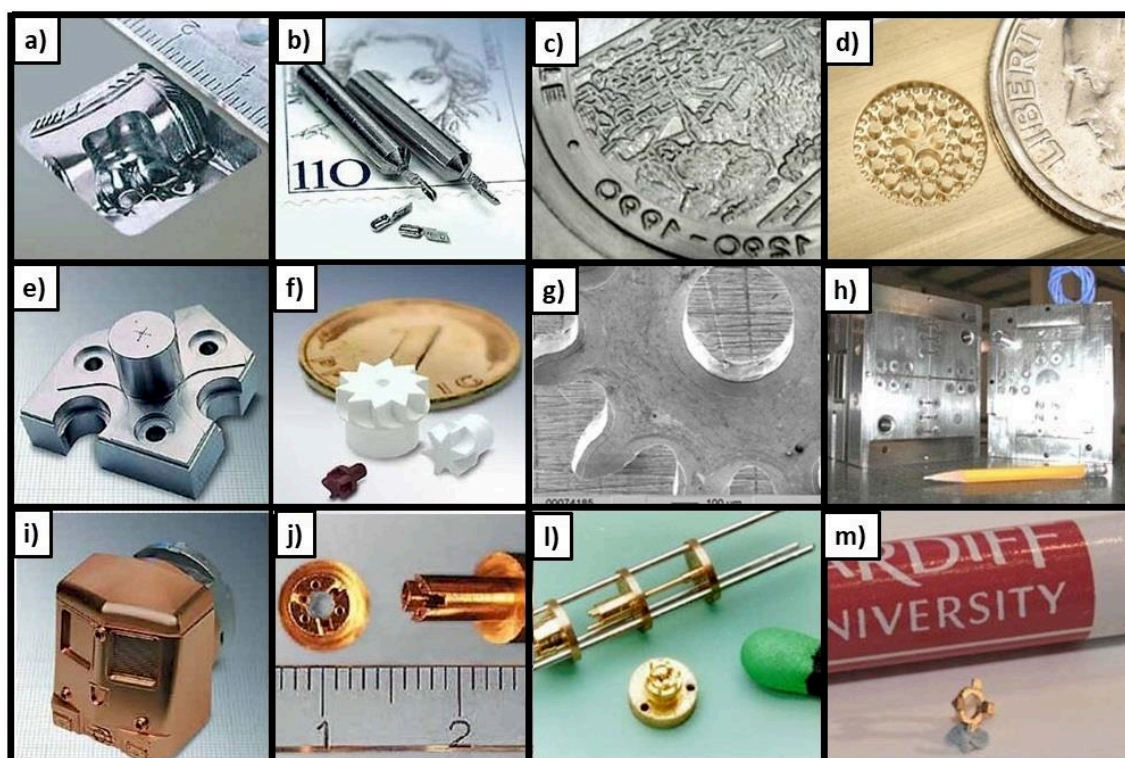


Figura 1.1 - Exemplos da utilização de microusinagem (Adaptado de MONDRAGON UNIBERTSITATEA, 2018).

Outros exemplos demonstrados na Fig.1.2 em (a) Peças para tecnologia médica, (b) Bombas e rotores, (c) Implantes, partes para dentaduras e implantes auditivos, (d) Peças para HPLC (cromatografia líquida), (e) Peças para nanopositioners, (f) Suportes de espelho, armações óticas, (g) Conectores de fibra óptica, conectores de fibra de vidro, (h) Peças de alta frequência, (i) Pontas de endoscópios, cabeças de endoscópios, cabeças de lentes, (j) Peças de relógios, placas de relógios, pontes e peças móveis, (l) Componentes para a indústria de semicondutores, (m) Moldes para fabricação de ferramentas (KERN, 2018).

Portanto, o microfresamento é considerado um processo viável por conseguir usinar geometrias complexas em uma ampla gama de materiais tais como: metais e ligas, compósitos, polímeros, cerâmicas, aços inoxidáveis, etc.

De acordo com Kern (2018) muitas empresas, das mais diferentes áreas, utilizam o processo de microfresamento como tecnologia integrada em seus sistemas de produção, como por exemplo: Bic, Gillette, Bosch, Iscar, Sandvik Coromant, Seco, Rolex, Bauer Christian, Angiomed, Biacore, Curasan, Microtronic, Oticon, Phonak AG, Microparts, Steag, Acritec, Alcon, Carrera, Arilens, Medicontur, Morcher, Star Surgical, GKN Sinter Metals, Esser, Amic, Daimler Chrysler, EADS, Fraunhofer Institute, Philips Research, Pro-micron, Siemens VDO Automotive, Daimler Chrysler, Pro-micron, 3M Unitek, Degussa, Ivoclar Vivadent, Feinmetal, IBM, Lumberg, Tyco electronics, entre outras. O mercado é promissor

e espera-se que os componentes e aplicações de microfresamento cresçam exponencialmente nos próximos anos.

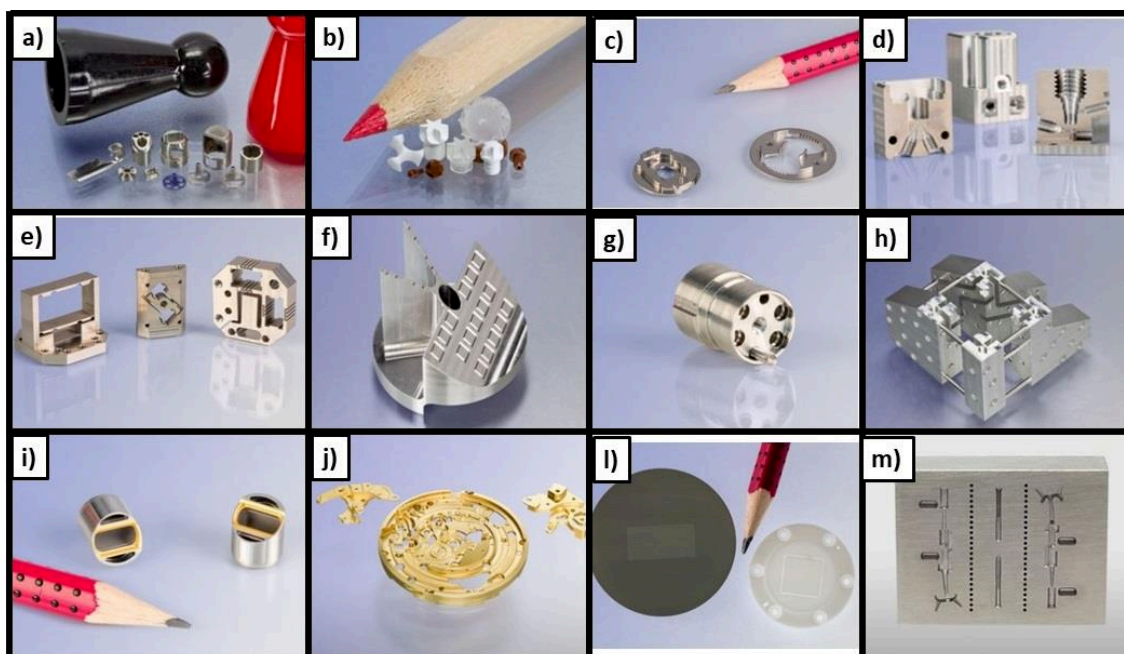


Figura 1.2 - Exemplos da utilização de microusinagem (KERN, 2018).

Em paralelo a microusinagem, outra tecnologia em plena ascensão é a manufatura aditiva de metais, onde a partir de modelo CAD, pode-se criar um objeto 3D através da adição de finas camadas de pó metálico ou mesmo arame. Esta tecnologia permite produzir formas complexas que não são possíveis apenas com a utilização das técnicas tradicionais de fundição e subtrativas, tais como usinagem convencional ou eletroerosão (RENISHAW, 2017), no entanto, técnicas como a fusão seletiva a laser (SLM) utilizada para a obtenção dos corpos de prova de aço inoxidável ABNT 316L que serão utilizadas neste trabalho, podem apresentar alguns problemas característicos do processo, tais como: porosidade, retração de solidificação, microfissuras, alta tensão residual, anisotropia, pobre acabamento superficial, distorção significativa de volume e microestrutura indesejável. Desta forma, para minimizar ou aliviar alguns desses defeitos ao se trabalhar com componentes de engenharia precisos, críticos ou de tolerância rígida, torna-se necessário a utilização de processos secundários, como polimento ou usinagem, para melhorar o acabamento ou produzir as dimensões finais necessárias (SADIQ, et al. 2018).

Em relação ao aço inoxidável 316L, este possui excelente resistência à corrosão, capacidade de conformação, ótima soldabilidade e excelentes propriedades mecânicas, sendo utilizado na fabricação de peças que exigem alta resistência à corrosão, tais como válvulas, tubos, recipientes, equipamentos hospitalares e farmacêuticos, peças para a

indústria química, petrolífera, têxtil, de laticínios, frigorífica, de tintas, etc. Este é recomendado para utilização em ambientes onde exista o ataque de substâncias corrosivas, tais como ácidos sulfúricos, ácidos sulfurosos, banhos clorados, soluções alcalinas, soluções salinas, etc. (ARCELORMITTAL, 2018). Apesar da vasta aplicação deste material (obtido através de técnicas convencionais) e sua popularidade na indústria, não foram encontrados trabalhos que mencionassem especificamente a microusinagem do aço inoxidável 316L SLM, sendo necessário portanto um estudo mais aprofundado para que se possa produzir produtos confiáveis e econômicos, principalmente porque os parâmetros utilizados para a obtenção da peça impressa, tais como, a potência e velocidade de varredura a *laser*, podem afetar completamente as propriedades do material (SADIQ, et al. 2018).

Desta forma, o microfresamento será utilizado para estudar a usinabilidade do aço inoxidável 316L obtido por manufatura aditiva através da técnica SLM (*Selective Laser Melting*) e também a identificação de qualquer limitação de processo em função da técnica de obtenção do material. As ferramentas de metal duro com os revestimentos: TiAlN, AlCrN, DLC, TiN e sem revestimento, bem como os parâmetros de corte serão selecionados para comparação direta, objetivando o estabelecimento das condições ideais de corte para melhoria da usinabilidade do aço inoxidável 316L SLM, através da análise dos fenômenos envolvidos no processo:

- Evolução do desgaste das ferramentas;
- Formas, mecanismos de desgaste e influência do revestimento;
- Rugosidade;
- Superfície microusinada obtida;
- Formação de rebarba;
- Formação de cavacos.

## **1.2. Objetivo Geral**

Investigar a usinabilidade do aço inoxidável 316L obtido por manufatura aditiva pelo processo de fusão seletiva a laser (SLM) através da comparação dos resultados da microusinagem utilizando ferramentas de metal duro com diferentes tipos de revestimentos.

## **1.3. Objetivos Específicos**

- Mensurar o desgaste progressivo das ferramentas;
- Identificar as formas e mecanismos de desgaste;

- Identificar os revestimentos adequados para uma maior vida da ferramenta;
- Avaliar a qualidade superficial através da análise dos diferentes tipos de rugosidade obtidos;
- Analisar a integridade superficial resultante e outras limitações do processo associadas ao material obtido por SLM;
- Investigar a formação de rebarbas e parâmetros que possam levar a sua diminuição;
- Avaliar a formação de cavacos;
- Comparar a usinabilidade dos dois diferentes tipos de amostras (S e C) obtidas por processos diferentes de varredura do *laser* na fusão do pó, variando também a utilização ou não de fluido de corte.

#### **1.4. Justificativa**

O grande desenvolvimento e inovações das diferentes técnicas de manufatura aditiva, tais como a impressão por fusão seletiva a laser (SLM), permite criar peças metálicas com formas variadas facilitando a fabricação rápida de diferentes dispositivos de engenharia. No entanto, quando estes componentes de engenharia são críticos e necessitam de alta precisão (menores desvios dimensionais), torna-se essencial a utilização de processos secundários de acabamento, tais como a microusinagem ou polimento. No entanto, existem poucas referências na literatura até o momento a respeito da microusinabilidade de peças impressas, principalmente em função do desconhecimento de sua microestrutura e propriedades mecânicas, variáveis conforme parâmetros utilizados para manufatura aditiva.

Outro fator pouco estudado, que necessita de pesquisas e resultados experimentais, é a influência dos revestimentos das microferramentas na microusinagem de materiais impressos.

Cabe ressaltar que este trabalho foi realizado em parceria com o Prof. Wayne Hung da Texas A&M University dos Estados Unidos, que produziu os corpos de prova utilizados.

#### **1.5. Estruturação do trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

O Capítulo I contém um texto introdutório, que aborda o tema principal, objetivos e justificativa da tese;

No Capítulo II é realizada uma revisão da literatura, sobre os temas: manufatura aditiva de metais, fusão seletiva a laser, estratégias de varredura do processo SLM, microusinagem, formação de rebarbas, desgaste da ferramenta, influência do revestimento

no desgaste da ferramenta, qualidade superficial e rugosidade, aço inoxidável ABNT 316L e microssinagem de peças fabricadas por manufatura aditiva;

No Capítulo III é apresentada a metodologia, contendo: caracterização do material, fixação e preparação das amostras e ferramentas, realização dos experimentos, análise das variáveis de saída (desgaste de ferramenta, qualidade superficial, formação de rebarbas, formação de cavacos);

No Capítulo IV, os resultados experimentais são expostos;

No Capítulo V, são apresentadas as conclusões da tese e sugeridas propostas de trabalhos futuros.

Por último, os trabalhos citados ao longo da tese são listados no capítulo de Referências Bibliográficas.

# CAPÍTULO II

## REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma breve revisão da literatura, onde são explorados os principais temas abordados na tese: manufatura aditiva de metais, fusão seletiva a laser, estratégias de varredura do processo SLM, microusinagem, formação de rebarbas, desgaste da ferramenta, influência do revestimento no desgaste da ferramenta, qualidade superficial e rugosidade, aço inoxidável ABNT 316L e microusinagem de peças fabricadas por manufatura aditiva

### 2.1. Manufatura aditiva de metais

A manufatura aditiva (MA), anteriormente conhecida como prototipagem rápida e que hoje também é conhecida coloquialmente como impressão tridimensional (3D), é uma técnica que se difere dos processos de fabricação convencionais por produzir um objeto sólido 3D, a partir do arquivo digital CAD, permitindo com que o produto seja desenvolvido com um alto nível de recursos de forma livre (interna e externamente) em uma geometria complexa (JAFARI e WITS, 2018; KURZYNOWSKI et al., 2018).

Para muitas pessoas, o termo impressão 3D remete apenas às impressoras de mesa de extrusão de polímero, no entanto, trata-se de vários processos muito mais abrangentes, que se desenvolveram muito nos últimos anos, aumentando seu foco na diferenciação da possibilidade de materiais utilizados (HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES, 2022). Atualmente os processos aditivos foram padronizados pela ISO/ASTM F52910 (2018) em sete categorias.: *vat photopolimerization* (VP), *powder bed fusion* (PBF), *binder jetting* (BJ), *sheet lamination* (SL), *material jetting* (MJ), *material extrusion* (ME) e *directed energy deposition* (DED) – da literatura inglesa.

Na Figura 2.1 são apresentadas estas sete famílias, exemplo de nomes alternativos de processos utilizados dentro de cada categoria, uma breve descrição do processo, seus pontos positivos e exemplos de materiais tipicamente utilizados. Entre todas estas, destacam-se que os processos SL, BJ, PBF e DED são normalmente utilizados para



impressão 3D de peças e componentes metálicos. Gomes et al. (2022) mencionam também em seu trabalho, o recente desenvolvimento das tecnologias: wire-arc (WAAM) e a manufatura aditiva por spray frio, como soluções específicas para impressão de componentes metálicos.

# As 7 Famílias da Manufatura Aditiva

De acordo com ISO/ASTM52910 (anteriormente ASTM F2792)


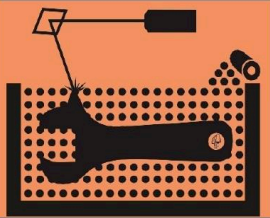

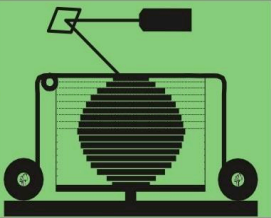

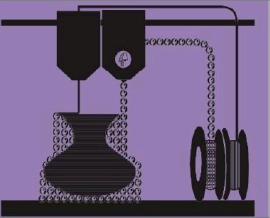

						
VAT Photo-polymerization (VP)	Powder Bed Fusion (PBF)	Binder Jetting (BJ)	Sheet Lamination (SL)	Material Jetting (MJ)	Material Extrusion (ME)	Directed Energy Deposition (DED)
<p><b>Nomes Alternativos:</b> SLA™ - Stereolithography Apparatus DLP™ - Digital Light Processing 3SP™ - Scan, Spin, and Selectively Photocure CLIP™ - Continuous Liquid Interface Production</p>	<p><b>Nomes Alternativos:</b> SLM™ - Selective Laser Melting; (a.k.a. SLS™ - Selective Laser Sintering); DMLS™ - Direct Metal Laser Solidification (f.k.a. Sintering); EBM™ - Electron Beam Melting; MJF™ - Multi Jet Fusion; SHS™ - Selective Heat Sintering</p>	<p><b>Nomes Alternativos:</b> 3DP™ - 3D Printing (Exemplos de processos: ExOne, Voxeljet, Desktop Metal's Production System™ e outros). *metal e cerâmica requerem sinterização pós-impressão</p>	<p><b>Nomes Alternativos:</b> LOM - Laminated Object Manufacture SDL - Selective Deposition Lamination UAM - Ultrasonic Additive Manufacturing</p>	<p><b>Nomes Alternativos:</b> Polyjet™ SCP™ - Smooth Curvatures Printing MJM - Multi-Jet Modeling Projet™</p>	<p><b>Nomes Alternativos:</b> FFF - Fused Filament Fabrication FDM™ - Fused Deposition Modeling APD™ - Augmented Polymer Deposition ADAM™ - Atomic Diffusion Additive Mfg* BMD™ - Bound Metal Deposition*</p>	<p><b>Nomes Alternativos:</b> LMD - Laser Metal Deposition LENS™ - Laser Engineered Net Shaping DMD - Direct Metal Deposition Laser cladding WAAM - Wire-arc Additive Manufacturing</p>
<p><b>Descrição:</b> Em uma cuba a resina fotopolimérica líquida é curada através da exposição seletiva à luz (através de um laser ou projetor) que inicia o processo de polimerização, fazendo com que as áreas expostas solidifiquem.</p>	<p><b>Descrição:</b> Os materiais em pó são fundidos seletivamente usando uma fonte de calor, como um laser ou feixe de elétrons até a consolidação da peça final. O pó que envolve a peça consolidada atua como material de suporte para os recursos pendentes.</p>	<p><b>Descrição:</b> Aglutinantes líquidos (orgânicos e inorgânicos) são aplicados seletivamente em camadas finas de material em pó, para construir peças camada por camada. Peças produzidas com pó metálico ou cerâmico passam depois por um processo de sinterização para diminuir os poros e melhorar as propriedades mecânicas.</p>	<p><b>Descrição:</b> Folhas de material são empilhadas e laminadas para formar um objeto. O método de laminação pode ser adesivo ou químico (papel/plásticos), soldagem ultrassônica ou brasagem (metais). As regiões desnecessárias são cortadas camada por camada e removidas, até a construção do objeto.</p>	<p><b>Descrição:</b> Gotas de material são depositadas camada por camada para fazer peças. As variedades comuns incluem jatear uma resina fotocurável e curá-la com luz ultravioleta, bem como jatear materiais termicamente fundidos que solidificam à temperatura ambiente.</p>	<p><b>Descrição:</b> Consiste na extrusão de material líquido, usualmente termoplástico, através de um orifício de dimensões reduzidas, sobre uma base, camada a camada. As variedades comuns incluem extrusão termoplástica aquecida (semelhante a uma pistola de cola quente), dispensando a utilização de seringa.</p>	<p><b>Descrição:</b> Pó ou filamento metálico é depositado em uma poça de fusão gerada na superfície da peça por um laser ou feixe de elétrons, onde soldado à peça ou às camadas inferiores já depositadas.</p>
<p><b>Pontos Positivos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto nível de precisão e complexidade</li> <li>• Acabamento de superfície suave</li> <li>• Suporta a construção de grandes áreas</li> </ul>	<p><b>Pontos Positivos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto nível de complexidade</li> <li>• O pó atua como material de suporte</li> <li>• Ampla gama de materiais</li> </ul>	<p><b>Pontos Positivos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite impressão em cores</li> <li>• Alta produtividade</li> <li>• Usa uma ampla gama de materiais</li> </ul>	<p><b>Pontos Positivos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Altas taxas volumétrica de construção</li> <li>• Custo relativamente baixo (não metais)</li> <li>• Permite combinações de lâminas metálicas, incluindo componentes embutidos.</li> </ul>	<p><b>Pontos Positivos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto nível de precisão</li> <li>• Permite peças coloridas</li> <li>• Permite vários materiais em uma única peça</li> </ul>	<p><b>Pontos Positivos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Barato e econômico</li> <li>• Permite várias cores</li> <li>• Pode ser usado em um ambiente de escritório</li> <li>• Possui boas propriedades estruturais</li> </ul>	<p><b>Pontos Positivos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Não limitado por direção ou eixo</li> <li>• Eficaz para reparos e adição de recursos</li> <li>• Vários materiais em uma única peça</li> <li>• Maiores taxas de deposição num único ponto</li> </ul>
<p><b>Materiais Típicos</b> Resinas Fotopoliméricas Curáveis por UV</p>	<p><b>Materiais Típicos</b> Plásticos, areia, pós metálicos e cerâmicos</p>	<p><b>Materiais Típicos</b> Plástico em pó, metal, cerâmica, vidro e areia.</p>	<p><b>Materiais Típicos</b> Papel, Folhas de Plástico e Folhas/Fitas Metálicas</p>	<p><b>Materiais Típicos</b> Fotopolímeros, Polímeros, Ceras</p>	<p><b>Materiais Típicos</b> Filamentos Termoplásticos (FFF); Líquidos e Pastas (Tipos de Seringa)</p>	<p><b>Materiais Típicos</b> Pó e fio de metal, cerâmica</p>

Figura 2.1 - As 7 famílias da manufatura aditiva (adaptado de HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES, 2022).

A manufatura aditiva de metais (MAM) tem como principais benefícios (RENISHAW, 2018):

- Produzir geometrias complexas, tais como estruturas de treliça, canais e características internas, entre outras;
- Consolidar várias peças em uma única ou menos componentes para aumentar a confiabilidade e reduzir o inventário;
- Ser utilizada como ferramenta complementar: pode ser integrada aos processos atuais de produção para reduzir etapas e tempo até o atingir o mercado, além de reduzir custos;
- Criar peças específicas ou customizadas para melhorar o desempenho;
- Reduzir peso de componentes: adiciona material somente onde é necessário, reduzindo o desperdício, otimizando a geometria da peça;
- Reduzir custos de ferramental: peças que podem ser produzidas diretamente, sem necessidade de ferramentas;
- Permitir rápidas iterações de projeto até a produção;
- Proporcionar aumento da liberdade de projeto: A MAM não é limitada pelas regras de projeto tradicionais.

Jafari e Wits (2018) categorizam a MAM em função da forma como o material é armazenado e o tipo de alimentação de matéria prima:

1. Sistemas de leito de pó: a fonte de energia transfere energia para a superfície do leito de pó, fundindo seletivamente o pó;
2. Sistemas de alimentação de pó: o pó é levado através de um bocal para a superfície, onde um *laser* é usado para fundir localmente;
3. Sistemas de alimentação de arame: o sistema é alimentado por um fio que é fundido pela fonte de energia.

Basicamente, todas estas técnicas usam princípios parecidos entre si, onde a peça é fabricada através do crescimento/adição em sucessivas camadas. Comparando os sistemas de alimentação de pó e alimentação de arame, os primeiros levam vantagem por permitir a fabricação de pequenos componentes e melhores acabamentos (JAFARI e WITS, 2018).

Consolidando sua importância, ressalta-se que a MA tem sido utilizada amplamente em diferentes áreas, como por exemplo na impressão de componentes mecânicos (HOFMANN, et al. 2014); moldes metálicos (CHUA, LEONG e LIM, 2010); componentes eletrônicos (ZHENG, et al. 2013); indústria automobilística, indústria aeroespacial,

aplicações ortopédicas, odontológicas e biomédicas (GUO e LEU, 2013); implantes e próteses (HE, XUE e FU, 2014); tecidos e órgãos (MURPHY e ATALA, 2014), entre outros.

## 2.2. Fusão seletiva a *laser* (SLM)

Entre as diversas categorias de MA, a fusão seletiva a *laser* (Selective Laser Melting - SLM) é uma variação da fusão em leito de pó (*Powder Bed Fusion* - PBF), sendo destinada a propósitos industriais. Ela utiliza um pó de metal como material inicial, que é fundido sequencialmente em camadas, utilizando um feixe de *laser* focalizado, que percorre uma trajetória pré-definida, chamada de estratégia de varredura (SADIQ et al. 2018; JAFARI e WITS; 2018).

A SLM é uma técnica muito utilizada para o desenvolvimento de produtos com menor custo/complexidade, menor tempo de produção, design exclusivo e menos restrições geométricas, quando comparado a outros processos de fabricação (JAFARI e WITS; 2018). De acordo com Olakanmi; Cochrane; Dalgarno (2015) a produção de peças através dos processos tradicionais de fabricação (fundição, forjamento, laminação, extrusão e metalurgia do pó) pode, em alguns casos, resultar em peças com estruturas de grãos grossos e pobres propriedades mecânicas, além de que, a utilização de ferramentas dentro dessas rotas de fabricação aumenta o custo de produção e o prazo de entrega. Neste contexto, a utilização de SLM é considerada promissora para empresas que desejam entregar seus novos produtos personalizados mais rapidamente e conquistar novos mercados consumidores para seus produtos, e ainda com a vantagem de economizar etapas de fabricação, por exemplo em relação ao processo de laminação.

A Figura 2.2 ilustra um típico processo de fabricação de uma peça com forma livre e geometria complexa pelo processo de SLM. Normalmente, a produção segue as seguintes etapas típicas (OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015; JAFARI e WITS; 2018):

1. Um projeto é desenvolvido em CAD representando uma peça física e um arquivo traduzido em um formato entendível pela máquina de MA (geralmente o formato STL) é exportado/enviado.
2. Um planejamento de processo automático é realizado com o corte do desenho no arquivo STL em várias camadas, espessura e orientação da trajetória de varredura. Essas instruções são enviadas para a máquina de fabricação automática.
3. A varredura de um ponto de *laser* sobre a área da seção transversal começa com trilhos pré-definidos depois que o pó é depositado na plataforma de construção, usando o *laser* para fundir e unir as partículas em uma lâmina fina.

4. Depois de terminar a varredura de uma camada, a plataforma é abaixada (profundidade de uma camada) e uma nova camada de pó é depositada no topo da camada anterior. As camadas subsequentes são criadas e simultaneamente ligadas a camadas já existentes até que toda a pilha de camadas 2D tenha sido criada e unida para formar a geometria descrita pelo modelo sólido 3D.

5. Depois de descarregar a placa de construção da máquina, o pó solto e qualquer estrutura de suporte são removidos e a peça é limpa. Comumente também é realizado um tratamento térmico para reduzir as tensões internas e melhorar as propriedades do material.

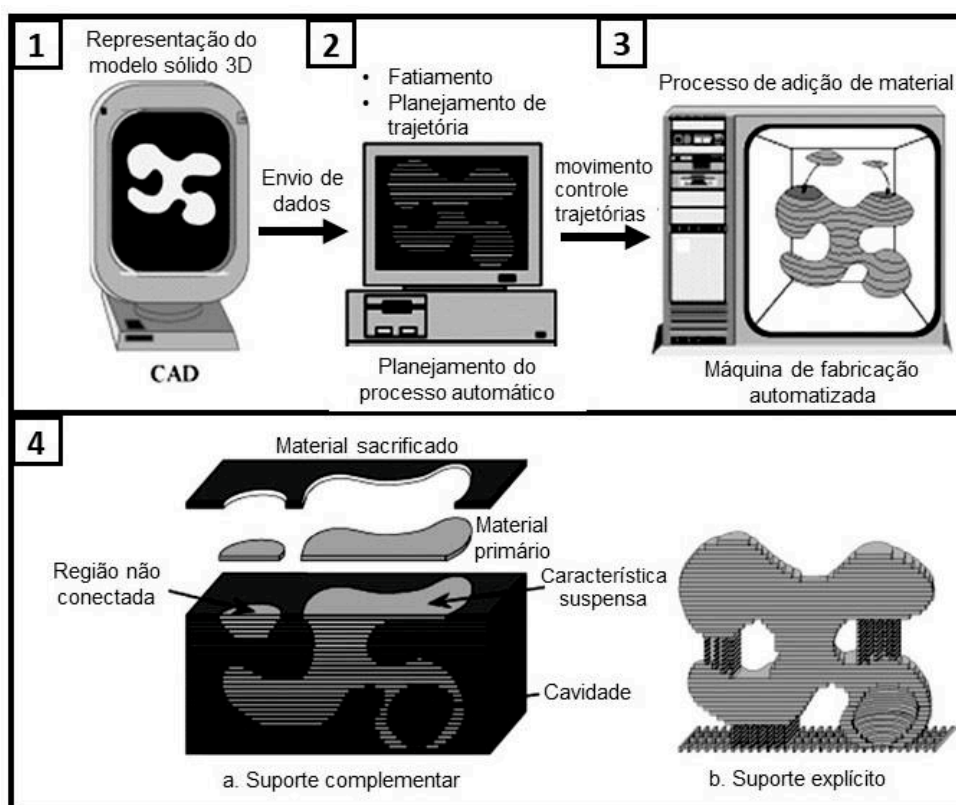


Figura 2.2 - Esquema de fabricação de uma peça por SLM (adaptado de OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015).

Uma grande vantagem em relação a este processo é que este pode ser considerado mais ecologicamente correto, quando comparado aos processos tradicionais, pois permite um uso mais eficiente da matéria prima, sendo possível a reciclagem e reutilização do pó metálico eventualmente não fundido. Este também reduz as emissões de poluentes em função da menor produção de matéria prima, com projetos voltados para redução de peso e ainda a diminuição do uso direto e indireto de produtos químicos tóxicos como os fluidos de corte (OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015). Seyda; Kaufmann; Emmelmann

(2012) estudaram o envelhecimento e a reciclagem do pó (não fundido) de Ti-6Al-4V em SLM ao longo de 12 ciclos, concluindo que o pó engrossa gradativamente e a densidade da partícula é ampliada (Fig. 2.3.a), no entanto a fluidez do pó foi melhorada, levando a uma distribuição mais consistente e uniforme do material em pó na plataforma, o que provocou uma redução da porosidade em 54% (comparada a inicial), porém a existência de partículas de pó maiores aumentaram a rugosidade superficial em aproximadamente 33% (Fig. 2.3.b).

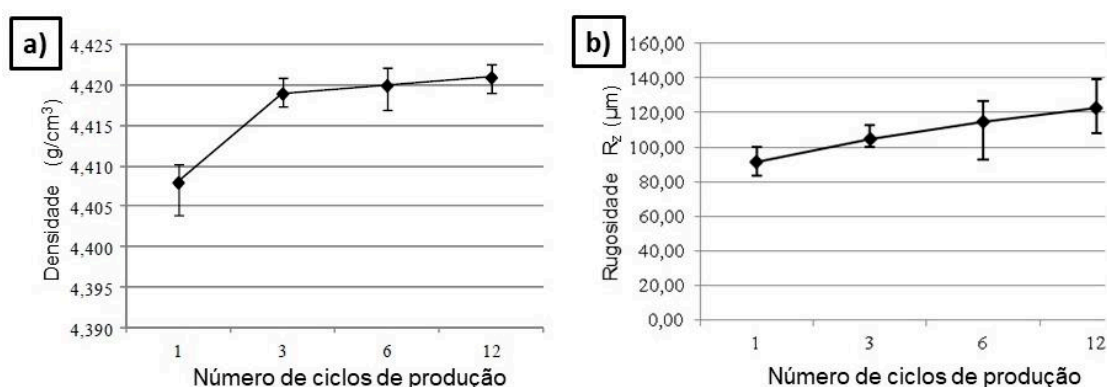


Figura 2.3 - (a) Densidade do material a granel fundido a laser (b) Rugosidade média da superfície do material a granel fundido a laser (adaptado de SEYDA; KAUFMANN; EMMELMANN, 2012).

Algumas áreas/produtos são consideradas promissoras para a aplicação da tecnologia SLM, tais como: ferramental rápido, materiais funcionais, tecnologia de satélite, componente de máquinas e projetos robóticos, implantes para fins médicos, entre outros (OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015).

De forma geral a SLM é uma técnica de fabricação em evolução, com vantagens e grande potencial, no entanto, apesar de parecer simples na teoria, na prática é bem mais complexa, pois se trata de um processo multi-físico, onde ocorre transferência e absorção de radiação *laser*, transferência de calor e a fusão com consequente consolidação do pó (SIMCHI, 2006; JAFARI e WITS; 2018).

Vários fatores influenciam as propriedades do componente final e são considerados desafios no processo SLM, como por exemplo as características do pó metálico e o procedimento de manipulação do mesmo, os próprios parâmetros do processo: potência do *laser*, diâmetro do feixe, velocidade e estratégia de varredura e os parâmetros relacionados à digitalização: espessura da camada, o espaçamento de hachura e o ajuste do feixe (OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015; JAFARI e WITS, 2018; KURZYNOWSKI et al., 2018). Em função da combinação e ajustes destes fatores, várias imperfeições ou características podem ser induzidas pelo processo, tais como: porosidade, distorção



térmicas das camadas, rachaduras, baixa precisão dimensional, aspereza da superfície, perda de elementos de liga, microestruturas não desejadas, altas tensões residuais, partículas fracamente fundidas e contração devido à solidificação. Estas imperfeições são fonte de preocupação não só pela questão estética, mas também pela confiabilidade do componente fabricado (OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015; KURZYNOWSKI et al., 2018; SADIQ, et al. 2018).

Sadiq et al. 2018 no estudo do microfresamento da superliga Inconel 718 SLM como alternativa para melhorar o acabamento da superfície, encontraram algumas dessas imperfeições na peça usinada, conforme pode ser observado Fig. 2.4 em (a) escória, inclusões, furo de retração, microfissuras; (b) camadas imperfeitas e superfície rugosa devido a soldagem parcial do pó; (c) trinca em poro seccionado pelo microfresamento; (d) Em 1 - escória embutida entre camadas, 2 - partícula de pó parcialmente derretida na entrada do canal e 3 - poro coberto com rebarbas.

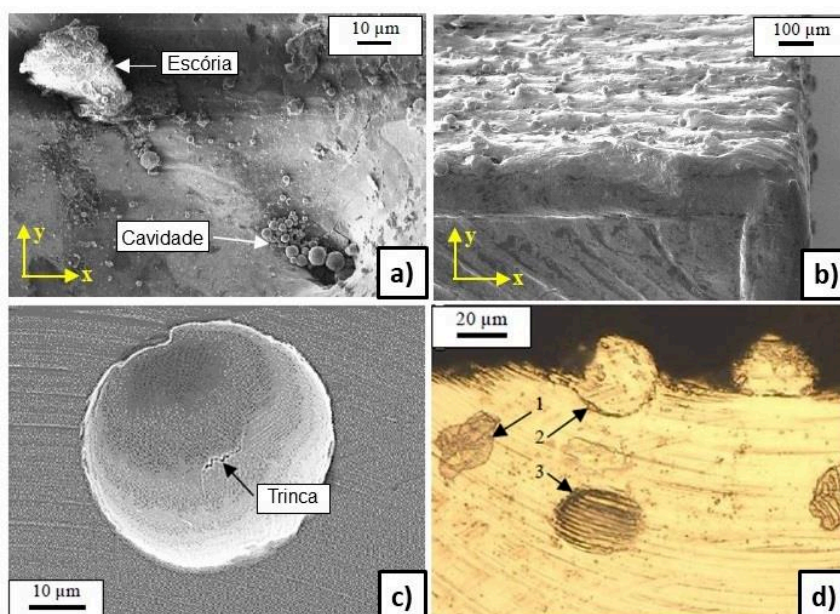


Figura 2.4 - Imperfeições no microfresamento da superliga Inconel 718 SLM (adaptado de SADIQ, et al. 2018).

Por todas essas questões já mencionadas e aliadas a várias características importantes de peças fabricadas por SLM serem significativamente diferentes quando comparados com peças fabricadas convencionalmente, torna-se necessário tratamentos de pós-processamento, como tratamento térmico, prensagem isostática a quente (HIP) e alguma operação para melhorar o acabamento superficial, visando obter propriedades mecânicas satisfatórias necessárias para aplicações de componentes industriais. No

entanto, mais um ônus é adicionado ao processo, alongando o ciclo de produção, consequentemente aumentando o custo (JAFARI e WITS, 2018; KURZYNOWSKI et al., 2018).

### 2.3. Estratégias de varredura no processo SLM

Os fabricantes de equipamentos comerciais de MA, normalmente fornecem um padrão fortemente testado e estável, para configuração de alguns parâmetros que envolvem o *laser*, o sistema de movimento e o alimentador de material (TOYSERKANI, KHAJEPOUR e CORBIN, 2005). No entanto, outros parâmetros relacionados ao processo são fundamentais para a fabricação de produtos de boa qualidade, entre eles a estratégia de varredura a ser utilizada. Esta, juntamente com a velocidade de varredura, potência do *laser*, espaço de sobreposição do feixe de *laser* e até orientação da amostra na placa de construção, são citados como os responsáveis por alterar significativamente a textura cristalográfica durante o processo de fusão, alterando consequentemente as propriedades mecânicas e de corrosão de um componente fabricado por MA (KUNZE, et al. 2015; DEEV, KUZNETCOV e PETROV, 2016; GU e CHEN, 2018; SUN, et al. 2019).

A base para as estratégias de varredura, normalmente seguem os mesmos princípios aplicados em operações de fresamento, definidas pelo software CAM (*Computer Aided Manufacturing*), pois teoricamente, o movimento relativo da ferramenta para remover camadas de material é similar ao movimento da fonte de energia para adicioná-las. No entanto, dependendo do processo de MA utilizado, podem surgir novas preocupações, como o tamanho do ponto de laser, o fatiamento sólido, a seção transversal do grão, etc., que podem influenciar diretamente a atividade térmica das camadas recém-fundidas, impactando no material fundido nas camadas anteriores, consequentemente a microestrutura final da peça (GONG et. al. 2019).

Gu et al. (2020) afirmam que a estratégia de varredura é um parâmetro vital nos processos SLM, tendo um impacto significativo na formação da estrutura do grão e na textura cristalográfica e que a escolha assertiva deste parâmetro pode facilitar a formação de microestrutura homogênea e ainda melhorar propriedades mecânicas.

Outro problema frequentemente encontrado na MA é a presença de porosidades na peça final. Bourell et al. (2017) afirmam que os poros com forma esférica são devidos a gases aprisionados na região de fusão, já os poros com formato irregulares são devidos ao encolhimento, falta de ligação/fusão ou escassez de alimentação de material (quando aplicável), muitas vezes ocorrendo na borda de grãos fundidos e, portanto, sua formação sofre influência direta da estratégia de varredura.



Muitos pesquisadores têm estudado os efeitos das estratégias de varredura na morfologia da superfície de solidificação, microestrutura, propriedades mecânicas e textura cristalográfica em diferentes materiais. Marattukalam et al. (2020) compararam três estratégias de varredura diferentes na fusão seletiva a laser de 316L SS, conforme ilustrado na Fig. 2.5 em (a) direção de varredura a *laser* ao longo da direção Z, (b) direção de varredura a *laser* ao longo da direção Y e (c) varredura a *laser* no ângulo de 67°, girando a cada camada

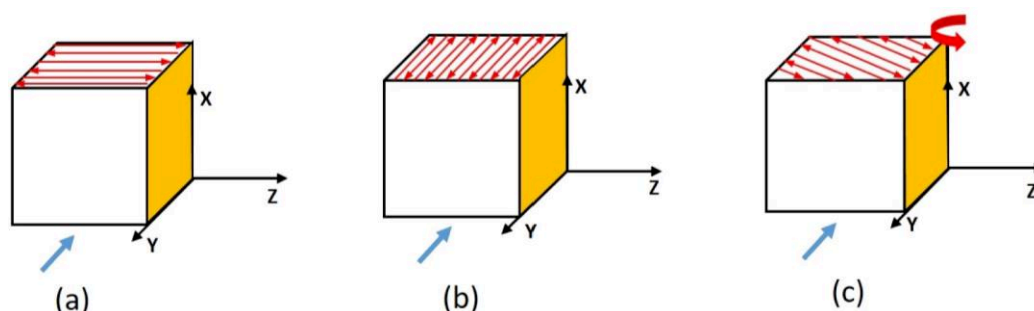


Figura 2.5 - Esquema ilustrativo das estratégias de varredura a laser usadas para a fabricação de amostras 316L SS (Adaptado de MARATTUKALAM et al., 2020).

Os mesmos autores concluíram que uma combinação adequada de potência do laser, velocidade de varredura e estratégia de varredura pode ser usada para determinar a textura resultante e que as estratégias de varredura bidirecionais (a e b da Fig. 2.5) possuíam vantagens no controle específico da orientação cristalográfica dos grãos, influenciando fortemente as propriedades mecânicas (dureza, módulo de Young, resistência ao escoamento e alongamento na fratura). Complementando, Andreau et al. (2019) ao compararem duas diferentes estratégias de varredura na fabricação do aço inoxidável ABNT 316L por SLM, concluíram que a orientação do grão não segue a textura padrão de acordo com a teoria de solidificação usual, apresentando em alguns pontos alta desorientação intergranular, atribuídas às diferentes geometrias da poça de fusão e a sobreposição do feixe de laser nas camadas adjacentes, o que prejudica o material obtido.

Resultados semelhantes foram encontrados por Wei, Mazumder e DebRoy (2015) que concluíram que mudanças no padrão de varredura a laser durante a manufatura aditiva de Inconel 718, levaram a diferenças marcantes nas texturas de solidificação e que através de modelagem numérica, eles poderiam personalizar essas texturas, de forma que contribuíssem para as propriedades e desempenho dos componentes.

Ribeiro, Mariani e Coelho (2020) compararam quatro diferentes estratégias de varredura e deposição (Fig. 2.6), na manufatura aditiva de 316L através do processo de Deposição Direcionada de Energia (DED), concluindo que estas influenciam consideravelmente a variação da geometria e densidade final da peça, sendo a estratégia

em espiral (Fig. 2.6 d), a que produziu peças com forma e acabamento mais finos, com densidade e microdureza semelhantes a do material AISI 316L convencional.

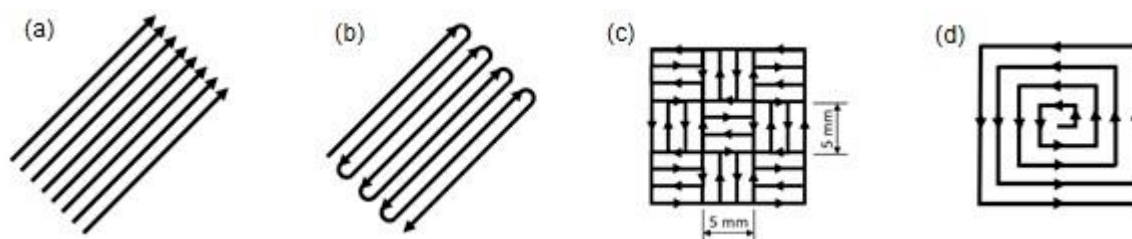


Figura 2.6 – Estratégias de varredura: (a) linear, (b) zigue-zague, (c) tabuleiro de xadrez e (d) espiral (Adaptado de RIBEIRO, MARIANI e COELHO, 2020).

Deev, Kuznetcov e Petrov (2016) também compararam estratégias diferentes de varredura na manufatura aditiva de 316L fabricadas por SLM, demonstrando experimentalmente uma forte dependência dos parâmetros de fusão do pó e da direção de construção dos corpos de prova nas propriedades mecânicas. Eles concluíram que o limite de escoamento e a resistência à tração podem ser maiores do que os de um corpo de prova de aço inoxidável obtido por tecnologia convencional, a resistência ao impacto é reduzida de 2 a 3 vezes em algumas amostras (dependendo da potência do laser), no entanto, os valores de dureza praticamente permanecem constantes em todas as amostras.

## 2.4. Microusinagem

Na microusinagem a interação entre a ferramenta e o material usinado apresenta um comportamento diferente em relação à macrousinagem devido à redução significativa das dimensões envolvidas (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006). Por esta razão, não se pode afirmar com toda certeza que o conhecimento sobre a formação de cavaco adquirido no estudo da usinagem tradicional pode ser aplicado ao corte em microescala, sendo necessária portanto uma maior investigação sobre o tema (SIMONEAU; ELBESTAWI, 2006).

Para adequação ao processo em microescala, as ferramentas e os parâmetros de corte são reduzidos proporcionalmente, porém o tamanho do grão do material a ser usinado não acompanha essa mesma redução, ficando com dimensões comparáveis a espessura de corte e ao raio de aresta da ferramenta, desta forma, a formação do cavaco pode ocorrer no interior de um único grão ou de poucos grãos, diferente do que ocorre na usinagem convencional, onde a formação do cavaco envolve o cisalhamento de diversos grãos ao mesmo tempo (CÂMARA et al., 2012). Outra característica é que em função das pequenas

espessuras de corte utilizadas, o cavaco tende a se formar na área do raio de aresta da microferramenta, ao invés de se formar na superfície de saída, em função das limitações em relação ao processo de fabricação da ferramenta em escala micro. Assim, o ângulo de saída da ferramenta ( $\alpha$ ) torna-se extremamente negativo, conforme ilustra a Fig. 2.7 (BISSACCO; HANSEN; CHIFFRE, 2005).

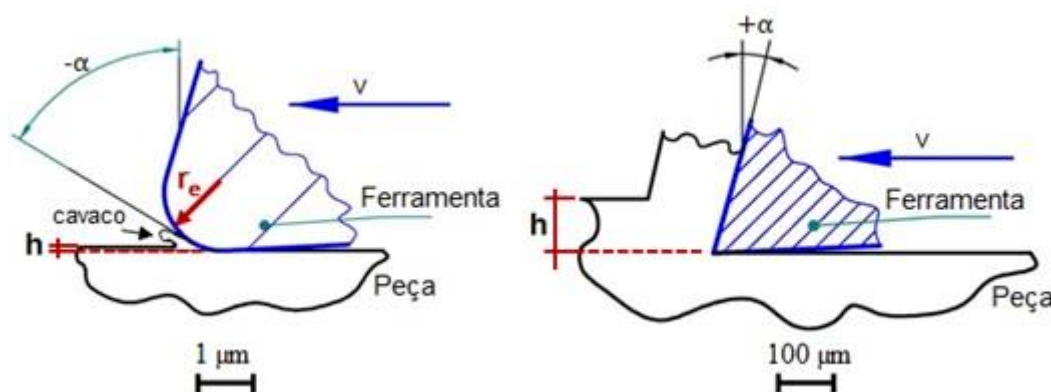


Figura 2.7 – Esquema da aresta de corte em (a) corte em microescala e (b) macroescala convencional (Adaptado de BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005; ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

Outro detalhe importante é que na microusinagem a remoção de material não ocorre para espessuras de corte ( $h$ ) menores que um determinado valor crítico (Fig. 2.8.a), definida como espessura mínima para formação de cavaco ( $h_{\min}$ ) (Fig. 2.8.b). Para espessuras menores que a espessura mínima não ocorre remoção de material (Fig. 2.8.c), ocorrendo apenas deformação (NIU; JIAO; CHENG, 2018; CHENG; HUO, 2013; KANG et al., 2007). Quando os cavacos são formados, devido às dimensões em escala micro, sua análise é uma tarefa muito difícil em função da dificuldade de coleta e manipulação, ficando muitas vezes limitada aos recursos microscópicos disponíveis para sua análise.

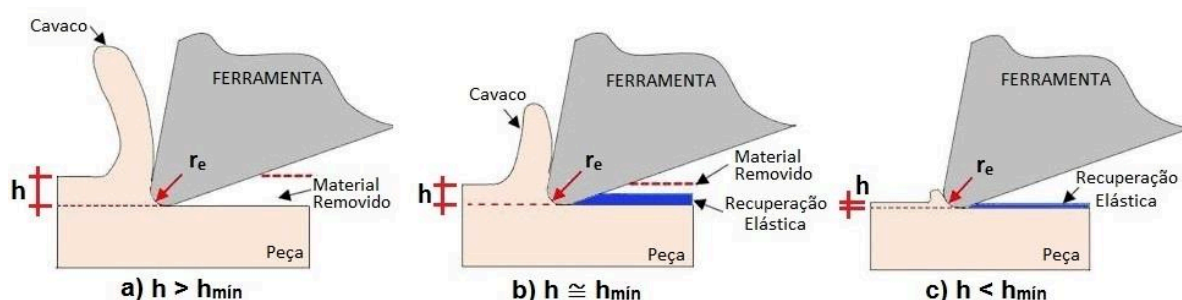


Figura 2.8 – Mecanismos de remoção de material na microusinagem (Adaptado de ARAMCHAROEN; MANTIVENGA, 2009).

Apesar das dificuldades inerentes ao processo, compreender a formação de cavacos é essencial para um bom controle dos mesmos, necessário para que se obtenha um bom acabamento superficial, alta precisão de usinagem, remoção efetiva dos cavacos da zona de usinagem e ainda a minimização da geração de rebarbas (ASTAKHOV; SHVETS; OSMAN, 1997; WANG et al., 2009). Mian, Driver e Mativenga (2011) afirmam também que a compreensão dos mecanismos de formação do cavaco é um fator importante na gestão do efeito escala em microusinagem.

De acordo com De Oliveira (2019) o efeito escala ocorre quando o raio de aresta da ferramenta chega a ser maior do que a espessura mínima de corte para ocorrer formação de cavaco, fazendo com que as energias específicas sejam elevadas e influenciando de forma significativa na microestrutura do material.

Motivados pela busca da fundamentação deste conhecimento científico, vários autores vêm estudando o tema ao longo dos anos. Por exemplo, Ueda e Manabe (1992) realizaram a microusinagem de um metal amorfo com uma ferramenta de cristal único de diamante, observando a formação de cavacos com estrutura lamelar típica, induzida pela ocorrência de deformação plástica relativamente homogênea e pela localização periódica da faixa de cisalhamento. Eles concluíram também que o espaçamento das lamelas aumentou proporcionalmente em função do aumento da profundidade de corte empregada. Simoneau, Ng e Elbestawi (2006) através da microusinagem de aço AISI 1045 e simulação por modelo de elementos finitos, encontraram um novo tipo de cavaco que chamaram de “©-shear-extrusion” (Fig. 2.9) onde os diferentes grãos que compõem a microestrutura do material apresentaram comportamento e contribuições individuais diferentes no processo de deformação plástica. Os grãos de perlita que possuem maior dureza são cisalhados, em um maior ângulo de cisalhamento em torno de  $238^\circ$ , enquanto os grãos mais macios de ferrita, quando compreendidos entre dois grãos mais duros de perlita, são extrudados e cisalhados de forma simultânea, em um menor ângulo de cisalhamento em torno de  $188^\circ$ . Assim, este tipo de processo gera uma oscilação do comprimento de contato cavaco-ferramenta, que os autores chamaram de “stick-slip”, afetando a ondulação e o grau de deformação plástica do cavaco formado (SIMONEAU, NG e ELBESTAWI, 2006).

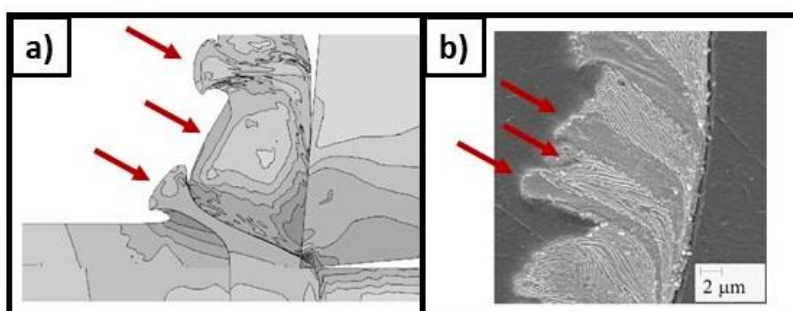


Figura 2.9 – Cavaco “©-shear-extrusion” com camadas alternadas de perlita e ferrita, em (a) imagem simulação FE e (b) imagens de seções transversais de cavacos obtidas em MEV (adaptado SIMONEAU, NG e ELBESTAWI, 2006).

Robinson e Jackson (2005) afirmaram também que o calor gerado na zona de cisalhamento secundário pode interferir na formação do cavaco, sendo suficiente para provocar aderência de parte do cavaco à ferramenta, alterando as condições de contato cavaco-ferramenta e, conseqüentemente alterando a profundidade de corte ajustada e a qualidade do acabamento superficial. Mian, Driver e Mativenga (2011) por sua vez, investigaram a formação de cavacos e mecanismos associados ao microcorte com ferramenta de aresta única, em seis diferentes tipos de materiais: Cu (OFHC), Al 6082-T6, aço AISI 1005, aço AISI 1045, Ti-6Al-4V, Inconel 718, e concluíram que em materiais ferrosos a fase perlita é responsável pelo controle da segmentação de cavacos. Os autores conseguiram ainda, através da decomposição dos sinais de emissão acústica (AE) correlacionar a morfologia dos cavacos com as energias computadas das bandas de frequência decompostas, através da técnica de transformada Wavelet.

Wang et al. (2009) estudaram quantitativamente a formação de cavaco por meio de uma abordagem híbrida analítica-FEM na microusinagem de Al6061-T6 com microfresa de metal duro de 152 µm de diâmetro e com duas arestas de corte. Tanto na simulação quanto no experimento eles obtiveram cavacos segmentados (Fig. 2.10.a), sendo as flutuações do comprimento de contato do cavaco-ferramenta e o comprimento da faixa de cisalhamento, consideradas as principais razões para a formação dos segmentos. Os autores também descreveram em detalhes todo o processo de formação de cavacos, ilustrado na Fig 2.10.b, através da análise da velocidade do cavaco, onde a velocidade máxima do cavaco localiza-se na raiz do cavaco antes e depois da geração de um segmento do cavaco, mudando para a ponta do cavaco no instante da formação do mesmo, em função da aceleração angular adicional causada por um aumento da diferença de momento do cavaco, conseqüentemente induzindo ao aumento da velocidade do cavaco.

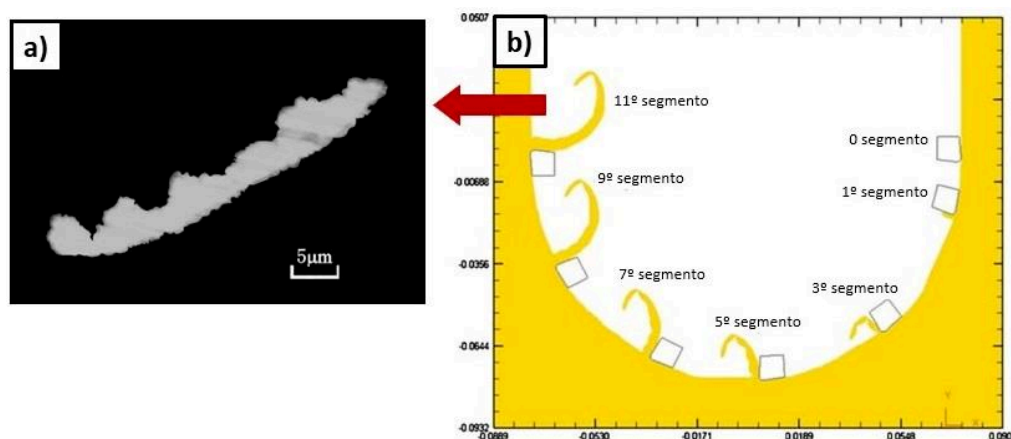


Figura 2.10 – (a) Cavaco segmentado obtido através de experimento e (b) Simulação de todo processo de formação de cavacos (adaptado WANG et al., 2009).

Outro detalhe importante é a obtenção do grau de recalque do cavaco ( $R_c$ ), que pode ser relacionado com a quantidade de deformação sofrida durante a usinagem, sendo importante para o cálculo do ângulo de cisalhamento teórico e estimativa da velocidade de saída do cavaco (TRENT; WRIGHT, 2000). Um maior ângulo de cisalhamento pode beneficiar a formação de cavacos, a superfície usinada e as forças de corte envolvidas no processo (LEE et al. 2003; ZHANG et al., 2015). A diminuição da espessura de corte, fará com que o grau de recalque diminua exponencialmente, sendo, portanto, fundamental para a microusinagem, visto que a diminuição de “h” está ligada diretamente ao aumento da energia específica.

Silva (2017) estudou o microfresamento de aço inoxidável duplex UNS 32205 utilizando ferramentas de metal duro com dois diâmetros diferentes (200 µm e 400 µm) e concluiu que a usinagem utilizando ferramentas com menor diâmetro apresentou menor quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário ( $R_c = 0,35$ ) do que a usinagem com as ferramentas de maior diâmetro ( $R_c = 0,43$ ) nas mesmas condições de corte. Ela observou também que os microcanais usinados com a ferramenta de maior diâmetro apresentaram menor quantidade de rebarbas e menor rugosidade superficial.

## 2.5. Formação de rebarba

A formação de rebarbas na microusinagem é um parâmetro crítico para os microcomponentes devido ao tamanho relativamente grande. No processo de microusinagem, diferentemente da usinagem convencional, a rebarba é geralmente muito difícil de remover, podendo ainda danificar seriamente a peça de trabalho (LEE; DORNFELD, 2002; LEE; DORNFELD, 2005).



Além disso, as rebarbas formadas na microusinagem também podem obedecer ao denominado fator escala e assumirem dimensões relativamente muito maiores do que nos processos convencionais.

Alguns trabalhos foram pioneiros ao estudarem a formação de rebarba na usinagem convencional, como por exemplo Schafer (1975) em seu trabalho “Deburring Processes em Perspective”. Alguns destes trabalhos criaram classificações que posteriormente foram consideradas usuais na microusinagem e são utilizadas desde então até os estudos mais atuais. Gillespie (1976), por exemplo, classificou diferentes tipos de rebarbas em função do mecanismo de formação: rebarba tipo Poisson (Fig. 2.11.a); rebarba tipo Rollover (Fig. 2.11.b); rebarba tipo Tear (Fig. 2.11.c) e rebarba tipo Cut-off (Fig. 2.11.d).

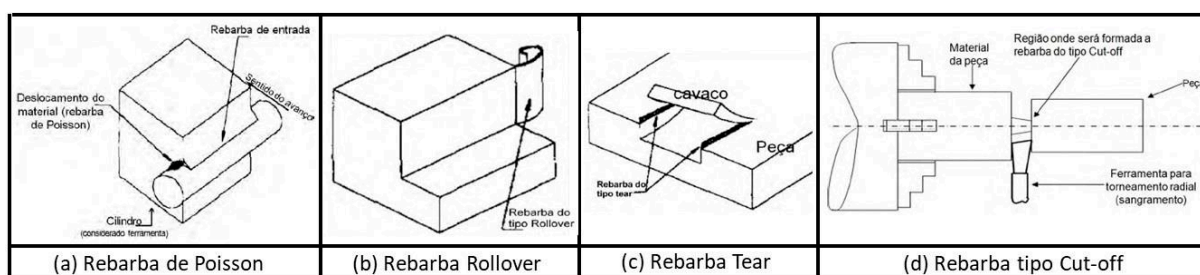


Figura 2.11 – Classificação de rebarbas geradas por usinagem com ferramenta de geometria definida (adaptado de GILLESPIE, 1976).

Chern (1993) e Lin (1999) usinaram alumínio e aço inoxidável, classificando a rebarba conforme a sua morfologia em função do ângulo de saída da peça e a profundidade de corte: rebarba tipo faca (Fig. 2.12.a); rebarba tipo caracol (Fig. 2.12.b) e rebarba tipo onda (Fig. 2.12.c).

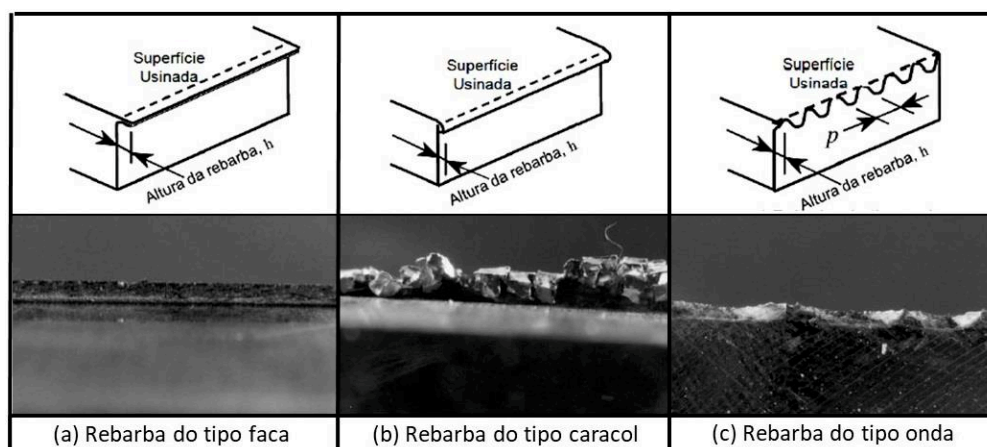


Figura 2.12 – Classificação de Rebarbas (adaptado de CHERN, 1993; LIN, 1999).

Entre os trabalhos da literatura que mais se aproximam do processo utilizado no presente trabalho, destaca-se o trabalho de Hashimura, Chang e Dornfeld (1999). Estes autores realizaram fresamento de topo em alumínio e cobre e, classificaram as rebarbas em oito tipos diferentes, quanto a forma e localização (Fig. 2.13.a): rebarba de entrada lateral concordante; rebarba de topo concordante e discordante; rebarba de saída lateral concordante e discordante; rebarba de entrada; rebarba de entrada lateral discordante e rebarba de saída. Os autores consideraram que apenas os cinco primeiros tipos eram influenciados pelos parâmetros de corte utilizados. Um pouco mais tarde Lee e Dornfeld (2002) consideraram aplicável a mesma classificação para o processo de microfresamento destes mesmos materiais. Kiswanto, Zariatín e Ko (2014) estudaram a influência da rotação, avanço e tempo de usinagem na formação de rebarbas em microfresamento de alumínio, classificando-as de forma semelhante ao realizado anteriormente (em função da forma e localização), porém em apenas quatro tipos diferentes (Fig. 2.13.b): rebarba de entrada lateral; rebarba de saída lateral; rebarba de topo, com destaque para o surgimento da rebarba inferior (no fundo do canal).

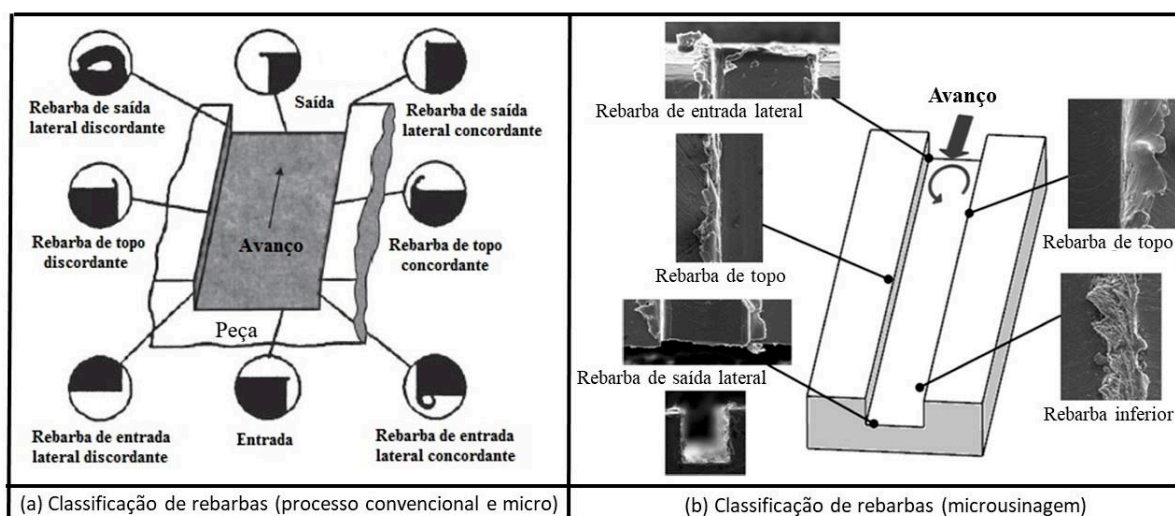


Figura 2.13 – Classificação de Rebarbas (adaptado de HASHIMURA, CHANG e DORNFELD, 1999; LEE e DORNFELD, 2002; KISWANTO, ZARIATIN e KO, 2014).

Chern et al. (2007) também investigaram o microfresamento em alumínio, no entanto classificaram as rebarbas em quatro outros tipos diferentes: rebarba primária (Fig. 2.14.a), rebarba em forma de agulha (Fig. 2.14.b), rebarba tipo pena (Fig. 2.14.c) e rebarba menor (Fig. 2.14.d). Os autores concluíram que a rebarba primária é formada quando o material à frente da ferramenta é empurrado, porém não chega a formar cavaco, sendo apenas deformado plasticamente e posteriormente quebra-se com dimensão próxima da metade do diâmetro da ferramenta. A rebarba primária pode ainda fragmentar suas extremidades dando



origem as rebarbas do tipo pena e agulha, e ainda a rebarba menor proveniente da utilização de avanço e penetração de trabalho muito pequenos.

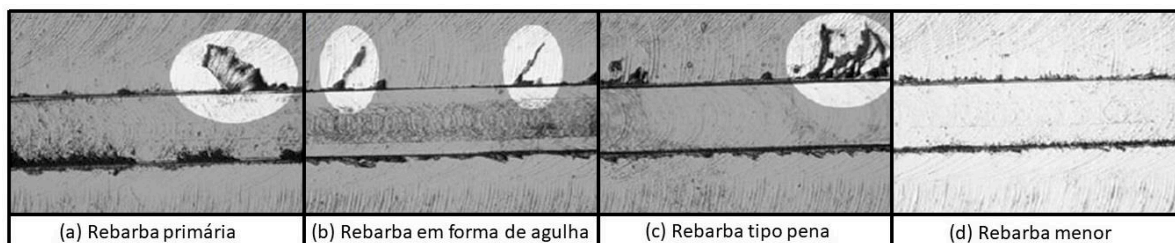


Figura 2.14 – Classificação de Rebarbas (adaptado de CHERN et al. 2007).

Alguns trabalhos estudaram o efeito das condições de corte, geometria de ferramenta e material usinado na formação das rebarbas. Chern (2006) ao usinar diferentes amostras de alumínio concluiu que a utilização de baixos avanços leva ao aumento da altura da rebarba de topo, sendo este resultado semelhante ao encontrado por Lekkala et al. (2011) ao usinar alumínio Al2124 e aço inoxidável 304, com microferramentas de metal duro (diâmetro de 300  $\mu\text{m}$  e 400  $\mu\text{m}$ , respectivamente) e também por Filiz et al. (2007) ao usinarem cobre comercialmente puro [101] com microfresas de metal duro de diâmetro de 254  $\mu\text{m}$ . Estes últimos concluíram que a menor formação de rebarba seria proveniente da combinação de baixas velocidades de corte e altos valores de avanço, conforme Fig. 2.15. Eles observaram ainda que as diferentes velocidades de corte utilizadas não influenciaram no aumento da rebarba, no entanto esta aumentou consideravelmente com o aumento da taxa de desgaste da microferramenta.

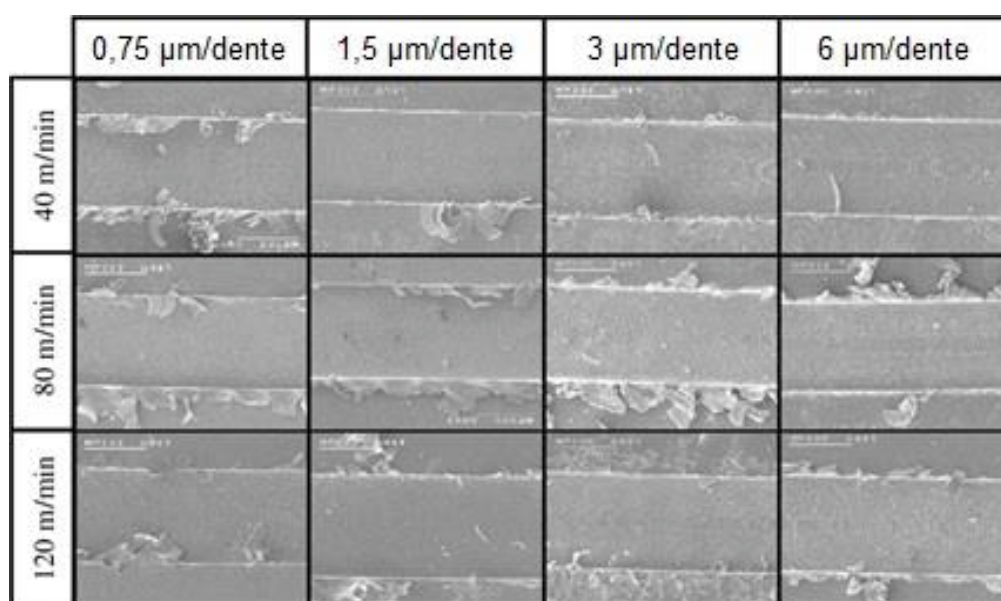


Figura 2.15 – Variação da rebarba em função da combinação  $v_c \times f_z$  (adaptado de FILIZ et al. 2007).

Em relação a influência da velocidade de corte, Biermann e Steiner (2012) encontraram um resultado contrário ao usinarem aço inoxidável austenítico X5CrNi18-10, onde o aumento da velocidade de corte favoreceu a redução da formação de rebarbas devido a uma maior resistência contra a deformação plástica.

De acordo com a literatura, a altura da rebarba formada no lado concordante no microfresamento de canais com microfresas de topo, é maior comparada à rebarba do lado discordante, sendo explicada pela quantidade de material que é empurrada na frente da aresta de corte e na direção da força de corte, como resultado da rotação da ferramenta (ARAMCHAROEN e MATIVENGA, 2009; LEE e DORNFELD, 2002).

O uso de pequenas profundidades de corte aumenta o atrito entre o cavaco e a ferramenta levando ao aumento do desgaste da ferramenta, conseqüentemente o aumento da rebarba (LEKKALA et al., 2011; KOU et al., 2015).

Yadav et al. (2017) em seus estudos reduziram em 96 % o tamanho da rebarba em função de um aumento da rotação de 10 000 rpm para 200 000 rpm no microfresamento experimental de Ti-6Al-4V e através de simulação conseguiram prever a altura e a forma da rebarba com 15 % de erro máximo. Lekkala et al. (2011) também sugeriram um método para prever a altura e espessura das rebarbas no microfresamento, com erro de previsão variando entre 0,65 % a 25,00 %. Eles concluíram também que o maior diâmetro da microferramenta resultou em uma menor altura das rebarbas, com os mesmos parâmetros de corte, sendo este fato atribuído a uma maior rigidez das ferramentas com o diâmetro maior, o que as tornam mais estáveis durante o processo de usinagem. Este resultado foi semelhante ao observado por Silva (2017) onde a altura das rebarbas em ambos os lados (concordante e discordante) diminuiu com o aumento do diâmetro das microferramentas, para as mesmas velocidades de corte.

Kou et al. (2015) usinaram uma liga de bronze e berílio (Qbe1.7) com microfresa de 500  $\mu\text{m}$  e demonstraram o efeito do uso de um adesivo instantâneo sobre a superfície da peça de trabalho. O adesivo forma um revestimento de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$  e altera a formação de rebarba. Os autores utilizaram rotação de 25 000 rpm, velocidade de corte de 39,25 m/min e profundidade de corte de 40  $\mu\text{m}$ , sendo desconsiderado a espessura do revestimento, visto que a dureza do adesivo instantâneo é muito menor do que o material da peça, o que tem pouco efeito na vida útil da ferramenta. Posteriormente a remoção do adesivo deixou a superfície da peça totalmente livre de rebarbas e sem contaminação (constatado por EDS), conforme Fig. 2.16.

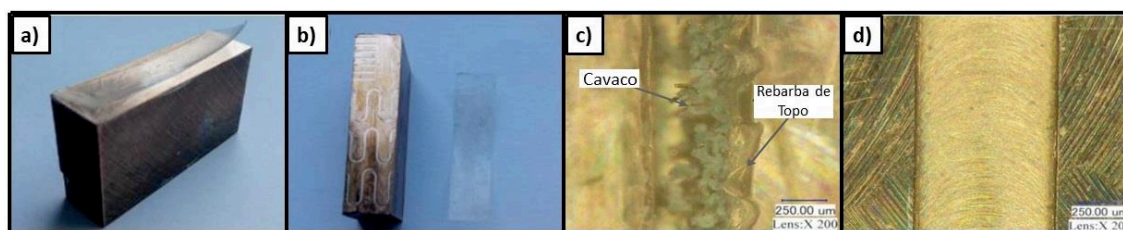


Figura 2.16 – Utilização de adesivo instantâneo. (a) Peça após aplicação do adesivo, (b) separação da peça usinada do adesivo, (c) imagem do canal ainda com o adesivo e (d) imagem do canal sem o adesivo (adaptado de KOU et al. 2015).

Um raio da aresta de corte grande ou o aumento deste em função do desgaste da ferramenta, resulta em um ângulo de saída negativo que promove a extrusão de material e influencia diretamente o tamanho das rebarbas (BAO e TANSEL, 2000; ARAMCHAROEN e MANTIVENGA, 2009; KISWANTO, ZARIATIN e KO, 2014; KOU et al. 2015). Na microusinagem de aço inoxidável (SS-304) e alumínio (Al2124), o aumento do número de dentes da microfresa diminuiu a altura das rebarbas tanto no fresamento do lado concordante como no discordante, sendo que a altura diminuiu com o aumento do diâmetro da microfresa (LEKKALA et al., 2011).

## 2.6. Desgaste da ferramenta

No microfresamento o comportamento das ferramentas utilizadas é bastante imprevisível, podendo ocorrer falhas catastróficas que levam à quebra da mesma de forma prematura (CÂMARA et al., 2012). Neste contexto, o estudo do desgaste das ferramentas é importante por contribuir para a minimização do impacto referente a perda de produtividade, custos adicionais e ainda contribuir indiretamente para o desenvolvimento de materiais e melhores ferramentas. No entanto, este estudo é dificultado por características inerentes ao processo, em que lascamentos ou até mesmo a quebra da ferramenta, só podem ser detectados com precisão através de observações em microscópio eletrônico de varredura. Não existe também um padrão único e inquestionável para medição e acompanhamento do desgaste das microferramentas, fazendo com que os diversos resultados encontrados por vários pesquisadores não sejam diretamente comparáveis, o que dificulta ainda mais os avanços científicos em relação a este conhecimento.

Zhu e Hu (2017) consideram duas categorias para estudos relacionados ao desgaste de microferramentas: os métodos indiretos que utilizam sinais de sensores, incluindo força de corte, vibração e emissão acústica (AE) e os métodos diretos, onde a própria imagem da

microferramenta desgastada é processada digitalmente para monitorar sua condição de desgaste.

Os métodos indiretos de monitoramento de desgaste e quebra de ferramentas podem ser uma necessidade muito maior em microusinagem do que na macrousinagem, devido à dificuldade de medir desgaste em ferramentas com reduzidas  $27\text{ditive}27t$ , como é o caso de microfresamento. Malekian, Parka e Jun (2009) utilizaram uma combinação dos sinais emitido por diferentes sensores como: acelerômetros, emissão acústica e de força para acompanhamento do desgaste de microfresas. Bao e Tansel (2000) através de simulações e experimentos utilizaram a força de corte para monitorar em tempo real as condições da ferramenta, conseguindo ainda estimar a vida útil remanescente das ferramentas com erro típico de 10 %. Hsieh, Lu e Chiou (2012) utilizaram a análise de sinais de vibração para distinguir microferramentas novas de desgastadas. Prakash e Kanthababu (2013) usaram um sensor de emissão acústica (AE) na microusinagem de alumínio, cobre e ligas de aço, concluindo que existe uma forte correlação entre esse tipo de sinal e o desgaste da ferramenta, principalmente o desgaste de flanco. Através de microscopia eletrônica de varredura identificaram também que em todos os materiais, os principais mecanismos de desgaste da ferramenta foram adesão e deformação plástica. Apesar destes estudos, Zhu e Hu (2017) ponderam que em condições de trabalho variáveis, característica da microusinagem, é sempre difícil estabelecer relações confiáveis entre as características do sinal e os diferentes estados de desgaste da ferramenta, como acontece também nos processos de macrousinagem.

Dentro dos métodos diretos, Filiz et al. (2007) investigaram a progressão do desgaste de ferramentas de  $254\ \mu\text{m}$  de diâmetro através da medição da redução do diâmetro na microusinagem de cobre OFHC, utilizando diferentes velocidades de corte. Eles constataram que a ferramenta apresentou desgaste severo, porém não houve quebra. No entanto, independentemente da velocidade de corte, os maiores desgastes foram observados com a utilização dos menores avanços. Ziberov et al. (2016) desenvolveram uma metodologia para medição do desgaste de flanco e assim acompanharam a evolução do desgaste em função do comprimento no microfresamento da liga Ti-6Al-4V com ferramenta de metal duro de diâmetro  $152,40\ \mu\text{m}$ . Os autores estabeleceram como critério de fim de vida um desgaste de  $10\ \mu\text{m}$ . A Fig. 2.17 mostra o resultado da vida da ferramenta sem revestimento. No corte a seco a vida da ferramenta foi quase 48 % maior, comparado ao corte utilizando MQL.

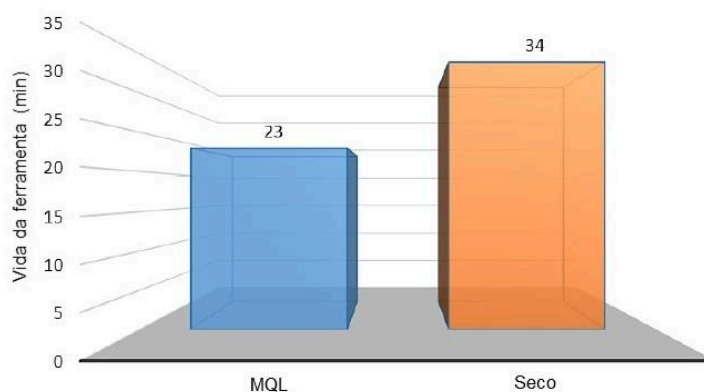


Figura 2.17 – Vida da ferramenta sem revestimento no microfresamento em condições de corte com MQL e seco (adaptado de ZIBEROV et al., 2016).

Szydłowski et al. (2016) apresentaram um novo método de reconstrução de imagens por EdoF (*Extended Depth of Field* – da literatura inglesa) baseado em uma análise estatística da transformada contínua bidimensional de Wavelet que permite a reconstrução da imagem (Fig. 2.18). O objetivo dos autores era construir uma máquina de inspeção e desenvolver algoritmos que permitissem a automação total da avaliação do desgaste da microferramenta. No entanto, os autores encontraram dificuldades em função das imperfeições geométricas das ferramentas e pelo fato de a espessura dos revestimentos terem valores similares ao desgaste, ficando complicada a definição do que de fato seria considerado desgaste na superfície analisada, por exemplo: remoção de defeitos de revestimento, remoção de revestimento parcial ou abrasão total do revestimento.

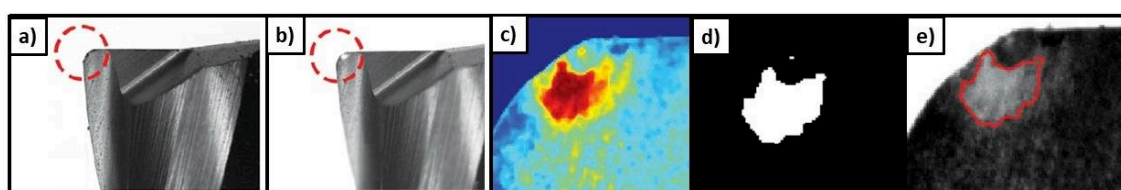


Figura 2.18 – Ferramenta reconstruída por EdoF (a) Ferramenta nova, (b) Ferramenta usada, (c) Mudança na intensidade da luz, (d) Segmentação da área de desgaste, (e) Área de desgaste na superfície de saída (adaptado de SZYDŁOWSKI et al. 2016).

Zhu e Hu (2017) realizaram estudos comparando a medição direta de desgaste, através de imagens 2D obtidas em microscópio óptico (Fig. 2.19.a) com a utilização do método tradicional de análise de imagem através de algoritmo de crescimento de região, onde é possível a medição do volume desgastado (Fig. 2.19.b). Os autores sugerem a utilização de um novo algoritmo desenvolvido por eles com base no método de análise de componentes morfológicos (*MCA – Morphological 28ditive28te analysis* – da literatura

inglesa) onde a região de desgaste é detectada, sendo possível medir e estimar a área de desgaste nas ferramentas utilizadas no microfresamento (Fig. 2.19.c).



Figura 2.19 – Medição e estimativa da área de desgaste (a) Medição direta através de imagens 2D, (b) Algoritmo tradicional, (c) Novo algoritmo baseado em MCA (adaptado de ZHU e HU, 2017).

Os autores concluem que a largura e a área da região desgastada aumentam gradualmente com o tempo (Fig. 2.20), verificando que a estimativa da área de desgaste é geralmente consistente na tendência com as medições de largura realizadas de forma manual através de imagens 2D. A área de desgaste estimada é maior do que a largura de desgaste, o que significa que a área de desgaste aumenta proporcionalmente mais rapidamente que a largura de desgaste. Concluíram também que a utilização da área de desgaste é mais eficiente do que a largura para avaliar os graus de desgaste da ferramenta, visto que esta apresenta variações entre as zonas de desgaste, como por exemplo na ponta e aresta de corte.

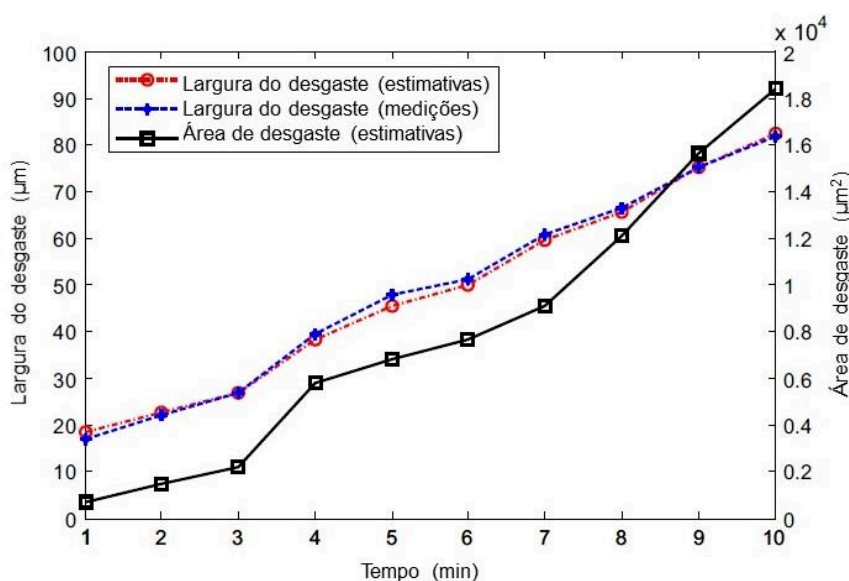


Figura 2.20 – Largura do desgaste da ferramenta e progressão da área com o tempo (adaptado de ZHU e HU, 2017).

## 2.7. Influência do revestimento no desgaste da ferramenta

Alguns autores desenvolveram pesquisas com o objetivo de avaliar o desgaste da ferramenta, comparando o desempenho de vários tipos de revestimentos. Aramcharoen et al. (2008) comentaram em seu trabalho que a comparação entre revestimentos só pode ser realizada para as ferramentas em que foi utilizada a mesma tecnologia de deposição e que o uso de fluídos de corte pode mascarar a contribuição de revestimentos. Os autores realizaram microfresamento de aço ferramenta H13 endurecido (45 HRC), utilizando ferramentas de metal duro de 500  $\mu\text{m}$  de diâmetro sem revestimento, comparadas a ferramentas iguais, porém com os revestimentos: TiN; TiAlN; TiCN; CrN e CrTiAlN. O desgaste de flanco médio foi reduzido em 41 % com o revestimento de TiN e 27 % quando utilizado o revestimento CrTiAlN, no entanto, as ferramentas revestidas com TiCN e CrN apresentaram desgaste de flanco significativo causado pela delaminação ou descascamento dos revestimentos a partir do substrato. Todos os revestimentos ajudaram a reduzir o desgaste da aresta de corte e o desgaste do raio da aresta de corte em comparação com as microfresas não revestidas, sendo o revestimento TiN o que apresentou melhor desempenho em todos os parâmetros analisados, inclusive melhor acabamento superficial e diminuição do tamanho das rebarbas, consequentemente maior vida útil (Fig. 2.21).

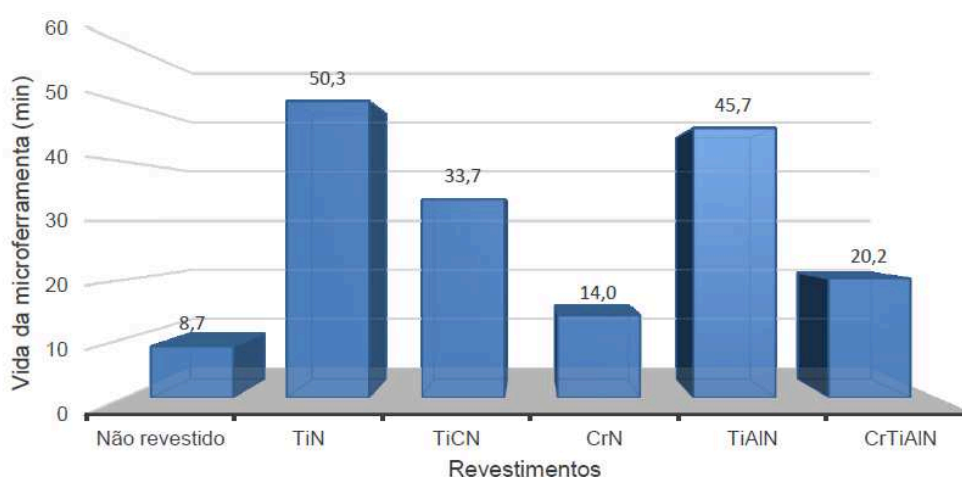


Figura 2.21 – Comparação dos revestimentos em função da vida útil da ferramenta de metal duro na usinagem de aço ferramenta H13 endurecido (ARAMCHAROEN et al. 2008; adaptado de ZIBEROV, 2018).

Resultado contrário foi encontrado por Biermann; Steiner; Krebs (2013) no microfresamento de aço inoxidável austenítico, onde o revestimento de TiN juntamente com



o revestimento de CrN apresentaram o pior desempenho em relação ao desgaste, provavelmente devido à afinidade química com o material da peça. Estes revestimentos se fragmentaram, deixando a aresta de corte exposta, conseqüentemente mais passível ao desgaste mais acelerado (quando comparados aos outros revestimentos testados). Os autores compararam ainda os revestimentos AlCrN, AlTiN e TiAlN, concluindo que revestimentos de AlCrN e TiAlN apresentaram os melhores resultados, com menor desgaste das microferramentas e que a utilização dos diferentes revestimentos não interferiu nas forças de corte.

Cristofaro et al. (2012) desenvolveram sete tipos diferentes de revestimentos nanocompósitos em monocamadas e multicamadas, com diferentes porcentagens de cromo, silício e titânio, comparando-os a um revestimento comercial (utilizado como referência) na microusinagem de aço endurecido (62 HRC). A Fig. 2.22 mostra a variação percentual do desgaste do flanco das ferramentas, apresentando os resultados dos melhores revestimentos (selecionados entre todos os novos revestimentos desenvolvidos) comparados ao valor medido nas ferramentas com revestimentos disponíveis comercialmente. Eles concluíram que a maioria dos revestimentos desenvolvidos apresentaram desempenhos comparáveis ou melhores do que o comercial, sendo o revestimento nanoestruturado com monocamadas e baixo teor de silício (revestimento E2) selecionado como o melhor revestimento entre todos, por reduzir o desgaste da ferramenta, proporcionando aumento da produtividade e confiabilidade.

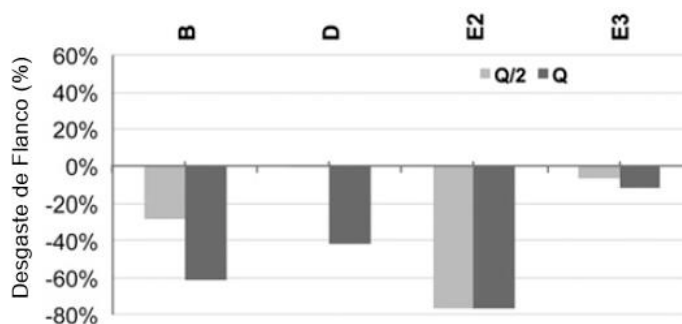


Figura 2.22 – Comparação do desgaste de flanco de ferramentas com novos revestimentos, comparados com revestimentos disponíveis comercialmente após a microusinagem de aço endurecido (Adaptado de CRISTOFARO et al., 2012).

Ucun, Aslantas, Bedir (2013) compararam experimentalmente a utilização de ferramentas de diâmetro 768  $\mu\text{m}$ , sem revestimento e com os revestimentos TiAlN+AlCrN, DLC, AlTiN, TiAlN+WC/C e AlCrN, na microusinagem de Inconel 718. Os autores concluíram que as ferramentas com revestimento apresentaram menores níveis de desgaste e menores



alterações de diâmetro quando comparadas as ferramentas sem revestimento, em função dos altos valores de dureza e dos baixos coeficientes de atrito dos materiais revestidos. O desgaste de flanco em função do mecanismo de desgaste por abrasão foi frequentemente observado e a formação de APC variou em função do tipo de revestimento. Os revestimentos DLC e TiAlN+WC/C apresentaram desempenho classificados como bom, com destaque para o DLC que além de aumentar a vida da microferramenta ainda melhorou o acabamento da superfície usinada. Os autores investigaram ainda a utilização de fluido de corte aplicado por MQL nos experimentos em que foi utilizada ferramenta revestida com AlCrN, apresentando resultado positivo em relação a um aumento significativo da vida útil da ferramenta e prevenção da adesão de cavacos.

## **2.8. Qualidade superficial e rugosidade**

A rugosidade de uma peça micro-usinada influencia diretamente a integridade e estrutura dos microcomponentes, principalmente os utilizados para fins dinâmicos (CHENG; HUO, 2013). Na topografia de superfície é encontrada toda a impressão dos fatores estáticos e dinâmicos ocorridos durante o corte, sendo esta considerada uma assinatura do processo de corte (ZHANG et al., 2015). Por exemplo, o desgaste da ferramenta pode ser identificado através de variações no valor da rugosidade  $R_a$ , sendo este parâmetro amplamente utilizado para controle de processo, visto que qualquer alteração expressiva no seu valor poderá representar diversas alterações no processo de corte (MUMMERY, 1992).

Diferentemente do que ocorre numa usinagem convencional com ferramenta de geometria definida, a utilização de pequenas espessuras de corte, especificamente abaixo de um determinado valor considerado ótimo (espessura mínima de corte) levará ao aumento da rugosidade, sendo esta característica relacionada ao efeito escala na microusinagem. Conseqüentemente, vinculado à espessura mínima de corte, também existe um avanço considerado ótimo a fim de minimizar a rugosidade superficial (HUO e CHENG, 2013). Chae; Park; Freiheit (2006) atribuem este aumento da rugosidade ao aumento significativo do atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho, que resulta em um aumento da temperatura e do desgaste da ferramenta, conseqüentemente diminui a qualidade superficial.

A fim de verificar a influência dos parâmetros de corte e o tempo de usinagem na rugosidade superficial, Kiswanto; Zariatin; Ko (2014) realizaram microfresamento de alumínio AA110, concluindo que a utilização de um avanço maior para um mesmo tempo de usinagem, não afeta significativamente a rugosidade. No entanto, avanços menores produzem acabamento superficial melhor, mas o processo perde eficiência em relação ao tempo de usinagem (FILIZ et al., 2007; KISWANTO; ZARIATIN; KO, 2014). Cheng e Huo

(2013) encontraram resultado diferente do apresentado por Kiswanto; Zariatin; Ko (2014), onde a variação do avanço afeta diretamente a rugosidade, sendo possível observar na Fig. 2.23 que em quase todas as velocidades de corte a rugosidade aumenta consideravelmente com a utilização de avanços menores que  $1 \mu\text{m}/\text{dente}$ , com aumento do avanço acima de  $2 \mu\text{m}/\text{dente}$  os resultados tendem a uma diminuição da rugosidade até que este excede  $3 \mu\text{m}/\text{dente}$ , onde  $R_a$  tende novamente a aumentar. Os autores chamam a atenção para o fato de que os baixos valores de  $R_a$  medidos (entre 24 a 47 nm) são muito menores que os encontrados na literatura, o que indica que o acabamento superficial no microfresamento depende não só das ferramentas de corte e condições, mas de todo o sistema de usinagem, incluindo os erros de movimento de guias de deslizamento, a excentricidade do eixo do corte e assim por diante.

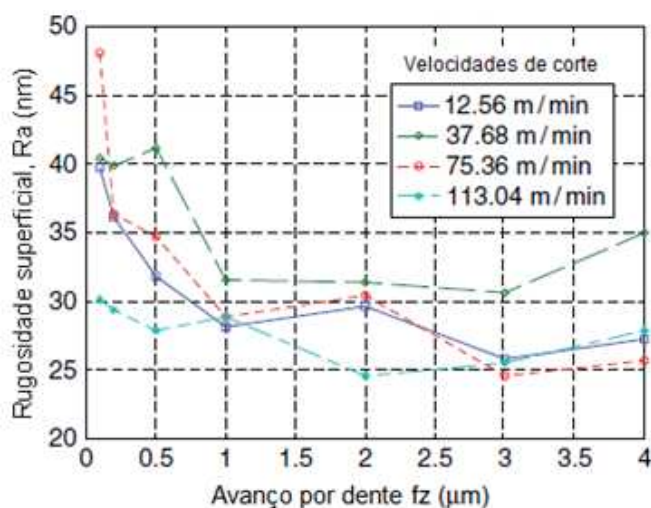


Figura 2.23 – Influência do avanço e velocidade de corte no microfresamento, utilizando ferramenta de metal duro (Adaptado de CHENG; HUO, 2013).

Weule; Huntrup; Tritschler (2001) realizaram microfresamento de aço SAE 1045, observando que o aumento da velocidade de corte não variou a rugosidade. Resultado semelhante ao encontrado por Filiz et al. (2007) na microusinagem de cobre [110] com ferramenta de metal duro, em que os autores complementam que a rugosidade só começará a aumentar acima de um determinado avanço, quando o cisalhamento se tornar predominante. Weule; Huntrup; Tritschler (2001) concluíram também que, em materiais mais dúcteis a diminuição da velocidade de corte pode aumentar a rugosidade, sendo este fato semelhante ao processo de corte convencional e que, quando mais duro e homogêneo o material da peça, menores serão as rebarbas formadas e menores os valores de rugosidade adquiridos (Fig. 2.24).

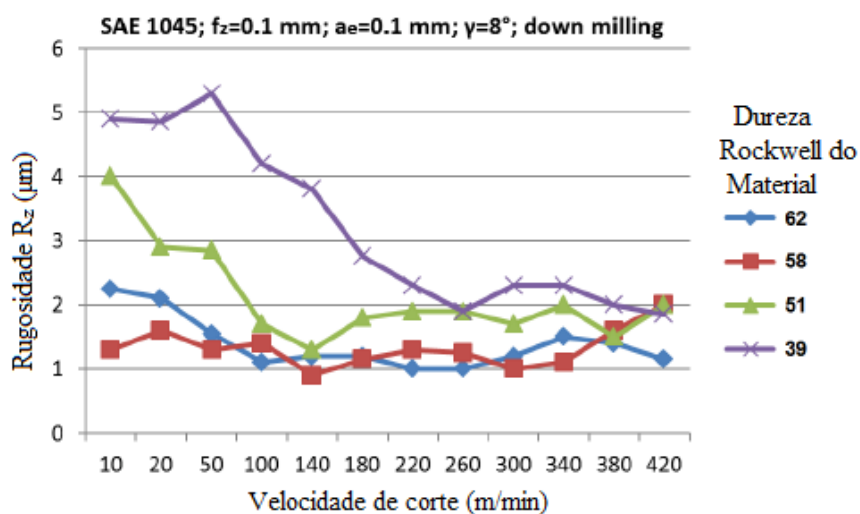


Figura 2.24 – Influência da velocidade de corte e da dureza do material na rugosidade superficial (Adaptado de WEULE; HUNTRUP; TRITSCHLER, 2001).

Com objetivos diferentes, Berestovskyi e Hung (2013) realizaram o microfresamento híbrido (fresamento e posterior polimento eletroquímico) em aço inoxidável 304 e 316L, nitinol e titânio, conseguindo produzir repetidamente microcanais com rugosidade superficial média na faixa de 100-300 nm. Os autores destacaram também que a formação de aresta postiça de corte (APC) piorou o acabamento da superfície e aumentou a formação de rebarbas, sendo este resultado similar ao encontrado por Ziberov (2018) que realizou microfresamento da liga Ti-6Al-4V com ferramenta de metal duro sem revestimento. Neste estudo foi concluído também que a utilização do fluido de corte aplicado na forma MQL (pressão de ar de 33 psi e vazão de 40,7 ml/h), melhorou a rugosidade da superfície usinada, evitando a formação de APC (Fig. 2.25). Em contrapartida, na usinagem a seco houve a formação de APC propiciando o aumento da vida útil da ferramenta, através da proteção da cunha cortante.

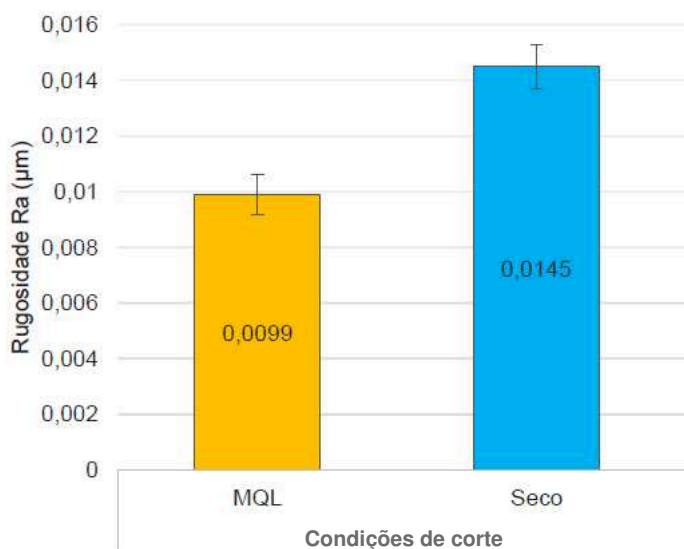


Figura 2.25 – Comparação dos valores de Ra com a utilização de MQL e a Seco após a usinagem de liga Ti6Al4V com ferramenta de metal duro (Adaptado de ZIBEROV, 2018).

## 2.9. Aço inoxidável ABNT 316L

Os aços inoxidáveis são ligas Fe-Cr com um mínimo de 10,50 % de cromo. A adição de outros elementos garante a diferenciação entre as ligas, formando um extenso conjunto de materiais. Na composição dos aços inoxidáveis, dois elementos se destacam: o níquel, por sua contribuição na melhoria das propriedades mecânicas e o cromo, por seu importante papel na resistência à corrosão e oxidação, que por sua vez, propicia a formação de uma fina película protetora (espessura aproximada de 30 a 50 angstroms) de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), chamada de camada passiva. Quanto maior o teor de cromo, mais resistente à corrosão é um aço inoxidável (ARCELORMITTAL, 2018).

A liga 316L é classificada como um aço inoxidável austenítico, não magnético, não temperável, com estrutura cúbica de faces centradas. Composto por ferro ligado com fração de massa de cromo de até 18 %, níquel até 14 % e molibdênio até 3 %, junto com outros elementos em menores proporções. Devido ao seu baixo teor de carbono (máximo 0,03 %), o 316L é resistente à corrosão intercrystalina, garantida até 400°C em uma extensa gama de bitolas (GERDAU, 2018; RENISHAW, 2018). O presente trabalho utilizou amostras de aço inoxidável 316L obtidas por manufatura aditiva através do processo SLM. Como referência, a Tab. 2.1 apresenta a composição química do pó de aço inoxidável 316L utilizado na fabricação das amostras por SLM, fornecida pelo fabricante.

Tabela 2.1 – Composição química do pó de aço inoxidável 316L (RENISHAW, 2018).

Elemento	Massa (%)
Ferro	Balanceado
Cromo	16 a 18
Níquel	10 a 14
Molibdênio	2 a 3
Manganês	≤ 2
Silício	≤ 1
Nitrogênio	≤ 0.10
Oxigênio	≤ 0.10
Fósforo	≤ 0.045
Carbono	≤ 0.03
Enxofre	≤ 0.03

A liga 316L apresenta boa ductilidade, inclusive em baixas temperaturas, resistência à oxidação de até 875°C, boa conformabilidade a frio, porém o encruamento é maior do que em aços não ligados, exigindo maiores esforços de conformação. Ela possui ainda alta dureza e tenacidade, alta capacidade de usinagem e pode ser altamente polido (GERDAU, 2018; RENISHAW, 2018; ARCELORMITTAL, 2018). Outras características genéricas do 316L obtido por processo convencional são fornecidas na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 – Dados genéricos do 316L forjado (adaptado de RENISHAW, 2018).

Densidade	7,99 g/cm <sup>3</sup>
Condutividade térmica	16,2 W/mK
Intervalo de fusão	1 371 °C a 1 399 °C
Coefficiente de expansão térmica (no intervalo 0°C a 100 °C)	16 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>

O aço inoxidável 316L possui grande popularidade na indústria, sendo aplicado em diversos componentes e setores, como por exemplo (RENISHAW, 2018):

- Matrizes para injeção de plástico e moldes para fundição sob pressão, matrizes de extrusão;
- Ferramentas cirúrgicas;
- Talheres e utensílios de cozinha;
- Componentes marítimos;
- Fusos e parafusos;
- Engenharia em geral.

Em relação às propriedades mecânicas é pertinente notar que cada mecanismo de consolidação da SLM culmina na formação de um produto final tendo microestrutura significativamente diferente em comparação com o mesmo material produzido de forma convencional, em função da manipulação dos parâmetros do processo SLM e das propriedades originais do pó (OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015). Na Tab. 2.3 são fornecidas algumas propriedades mecânicas de componentes fabricados aditivamente com pó de aço inoxidável 316L em condições consideradas ideais, fornecidas pelo fabricante. Ressalta-se o fato de as propriedades serem diferentes em função da direção medida (horizontal e vertical), podendo variar também em função da estratégia de varredura do *laser* na fusão do metal, necessitando, portanto, de estudos mais aprofundados e comparativos em relação as diferentes técnicas.

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas de componentes 316L fabricados aditivamente (adaptado de RENISHAW, 2018).

<b>Resistência à tração superior (UTS) (ver nota 1)</b>	
Direção horizontal (XY)	676 MPa $\pm$ 2 MPa
Direção vertical (Z)	624 MPa $\pm$ 17 MPa
<b>Resistência ao escoamento (ver nota 1)</b>	
Direção horizontal (XY)	547 MPa $\pm$ 3 MPa
Direção vertical (Z)	494 MPa $\pm$ 14 MPa
<b>Alongamento no intervalo (ver nota 1)</b>	
Direção horizontal (XY)	43% $\pm$ 2%
Direção vertical (Z)	35% $\pm$ 8%
<b>Módulo de elasticidade (ver nota 1)</b>	
Direção horizontal (XY)	197 GPa $\pm$ 4 GPa
Direção vertical (Z)	190 GPa $\pm$ 10 GPa
<b>Dureza (Vickers) (veja nota 2)</b>	
Direção horizontal (XY)	198 HV0.5 $\pm$ 8 HV0.5
Direção vertical (Z)	208 HV0.5 $\pm$ 6 HV0.5
<b>Rugosidade superficial (<math>R_a</math>) (ver nota 3)</b>	
Direção horizontal (XY)	4 $\mu$ m to 6 $\mu$ m
Direção vertical (Z)	4 $\mu$ m to 6 $\mu$ m

\*Nota 1 - Testado à temperatura ambiente pelo laboratório credenciado Nadcap e UKAS. Teste ASTM E8. Usinado antes do teste.

\*Nota 2 - Testado de acordo com ASTM E384-11, após o polimento.

\*Nota 3 - Testado de acordo com JIS B 0601-2001 (ISO 97), após o jateamento de esferas.

Em função da variabilidade dos parâmetros que podem ser utilizados no processo de obtenção de peças metálicas por SLM e com o objetivo de identificarem os parâmetros e condições ideais, afim de evitar os problemas típicos deste processo (mencionado no item 2.2 deste trabalho), alguns pesquisadores tem estudado a obtenção do aço inoxidável 316L por SLM, como por exemplo Kurzynowski et al. (2018) que estudaram a correlação entre os parâmetros de processo, microestrutura e propriedades deste material. Os autores variaram

a potência do *laser* (100 W e 200 W) e empregaram duas estratégias de varredura (listras alternadas sem e com novo derretimento após cada camada) para avaliar o impacto na microestrutura e textura das amostras. Com a vários parâmetros de processo que asseguram uma porosidade abaixo de 0,2 %, os autores descobriram que estes afetam fortemente a microestrutura (subestrutura celular da austenita e a quantidade de ferrita formada), bem como o tipo e o grau de textura.

Tucho et al. (2018) investigaram os efeitos dos parâmetros de processo na microestrutura e na dureza do aço inoxidável 316L SLM, preocupados com a degradação da densidade e a diminuição da resistência do material em função da porosidade típica do processo. Para tanto, os autores fabricaram várias amostras utilizando a faixa de densidade de energia de 50 a 80 J/mm<sup>3</sup>, concluindo ao final que este é o parâmetro mais influente no controle da porosidade e melhoria da densidade dos materiais, onde a porosidade diminui quase exponencialmente (Fig. 2.26.a) e a dureza aumenta linearmente (Fig. 2.26.b), com o aumento da densidade de energia.

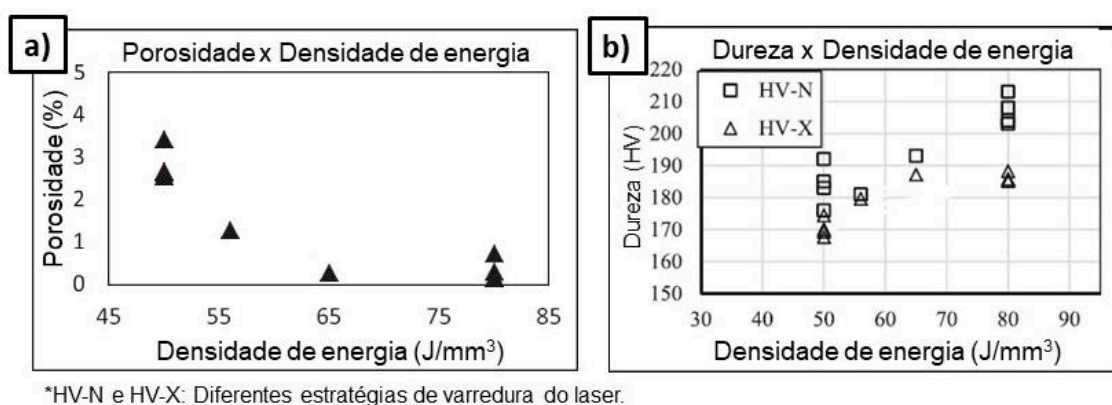


Figura 2.26 – Influência da densidade de energia, em (a) em função da porosidade (b) em função da dureza do aço inoxidável 316L SLM (Adaptado de TUCHO et al. 2018).

## 2.10. Microusinagem de peças fabricadas por manufatura aditiva

Apesar das inúmeras vantagens das peças fabricadas por MA, como a construção de geometrias complexas muito próximas ao produto final, alguns defeitos são característicos destes processos, como por exemplo: controle de tolerâncias dimensionais e de forma, superfícies ásperas, defeitos geométricos, distorção induzida pelo calor, cavidade de contração e imprecisão dimensional (DENTI e SOLA, 2019; KUMAR, 2019), além de outros defeitos metalúrgicos. A fim de diminuir os impactos destes defeitos, torna-se essencial a utilização de tratamentos de pós-processamento, para algumas aplicações específicas.

Em geral, processos subtrativos tradicionais e não tradicionais são utilizados para controle de superfície e geometria. Dentro deste contexto, os processos de usinagem tradicional são comumente utilizados, fornecendo as seguintes vantagens à operação de pós-processamento (GOMES et al., 2022):

- restaura a precisão geométrica e a qualidade da superfície,
- complementam os processos de MA, visto que estes não podem gerar com precisão detalhes precisos, como roscas (internas e externas), recursos com altas tolerâncias de forma (ex.: planicidade, cilindridade),
- remove as estruturas de suporte, necessárias para a construção de componentes complexos.

No entanto, o microfresamento de metais produzidos por SLM (ou outras técnicas de manufatura aditiva), assim como a comparação com a microusinagem dos materiais obtidos por processo convencional, foram muito pouco estudadas até o momento. Li e Gong (2019) estudaram a usinagem do aço inoxidável 316L, fabricado através da técnica LAM (*Laser 39ditive manufacturing*). Apesar dos resultados não poderem ser comparados diretamente, visto que foi utilizada uma fresa convencional de 20 mm, é importante ressaltar que os autores relataram elevada taxa de desgaste das ferramentas e quebras, concluindo que estes fatores são complexos em peças fabricadas por manufatura aditiva, principalmente pelo fato de suas propriedades serem afetadas por diversos fatores e parâmetros característicos do processo de MA. Ao trazer este conceito para a microusinagem, sabendo que o pó metálico também possui limitações em relação às suas dimensões, consequentemente ao tamanho do grão formado, pode-se concluir que estes efeitos indesejados podem ser potencializados devido ao efeito escala.

Resultado contrário a este foi observado nos estudos conduzidos por Ji et al. (2021), com o objetivo de comparar a microusinagem de IN718 forjado e fabricado por SLM, utilizando como referência parâmetros de corte reconhecidos como adequados para microfresagem do IN718 forjado. Para tal, foram realizados quatro experimentos em cada tipo de material, variando a rotação (25 000 rpm - 30 000 rpm) e a velocidade de avanço (5 mm/min - 10 mm/min), mantendo a profundidade de corte (50  $\mu$ m). Foram utilizadas microfresas de metal duro, 300  $\mu$ m de diâmetro, 2 arestas, revestimento NAlTi. Os autores constataram que o desgaste das ferramentas aumentou com o aumento da rotação e da velocidade de avanço, sendo menores para as peças fabricadas por SLM. No entanto, em concordância com os autores citados anteriormente, estes também afirmaram que os parâmetros de corte utilizados como referência em materiais forjados não são adequados para componentes fabricados por SLM, em função das diferentes características de



usinabilidade, o que torna o estudo nesta área essencial para que sejam criados parâmetros mais adequados.

De Oliveira Campos et al. (2020) também estudaram a comparação da microusinagem de Ti6Al4V fundido e fabricado por SLM. Utilizaram microfresas de metal duro, 500  $\mu\text{m}$  de diâmetro, 2 arestas, sem revestimento. Para os experimentos mantiveram constantes a rotação de 18 000 rpm, a velocidade de corte de 28,3 m/min e profundidade de corte de 40  $\mu\text{m}$ , variando o avanço por dente de 0,5 até 4,0  $\mu\text{m}$ . A cada experimento (4 mm usinados) o avanço por dente era acrescido de 0,5  $\mu\text{m}$ , totalizando 8 experimentos chamados de Lote A. A fim de estudar a influência do desgaste em função da dimensão do avanço por dente inicial, foi realizado um novo lote de experimentos (Lote B) de forma decrescente, diminuindo o avanço por dente após cada teste. A Figura 2.27 apresenta os resultados obtidos de rugosidade e altura da rebarba de topo. Os autores concluíram que, o comportamento da rugosidade ao variar o avanço por dente foi semelhante para ambos os materiais e em geral menor para a amostra SLM, devido a menor ductilidade, maior dureza e menor recuperação plástica durante o corte. Em relação a formação de rebarbas, constataram que em geral, as maiores alturas (para ambos os materiais) foram observadas do lado concordante, com tendência de diminuição em função do aumento do avanço por dente. Eles observaram também que, o material SLM apresentou menor formação de rebarbas, sendo este fato atribuído ao menor desgaste da ferramenta, conseqüentemente menor alteração da aresta de corte durante o processo.

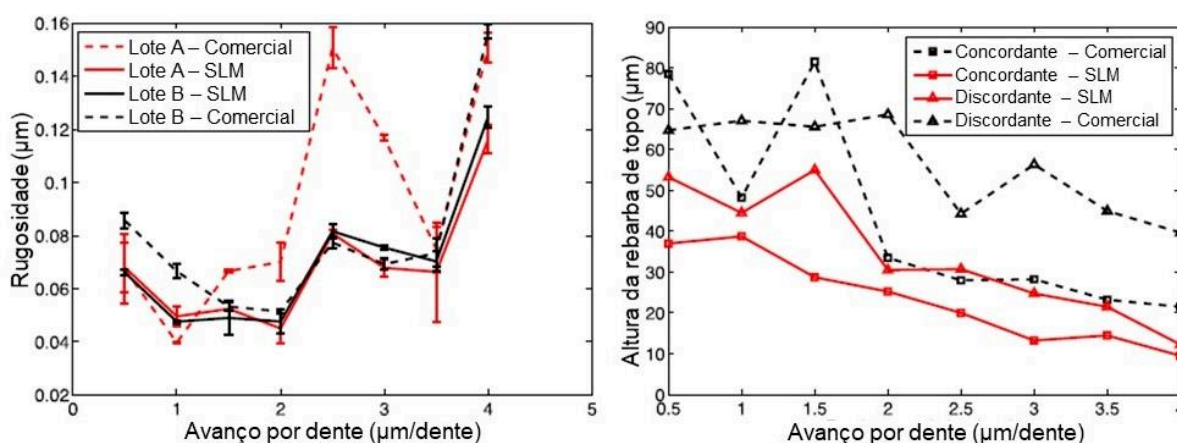


Figura 2.27 - Rugosidade e altura da rebarba de topo na microusinagem de Ti6Al4V fundido e fabricado por SLM (Adaptado de DE OLIVEIRA CAMPOS et al. 2018).

De Oliveira Campos et al. (2020) concluíram ainda que, as forças de corte obtidas na microusinagem do Ti6Al4V SLM foram em média 9,3% menores, apresentando também

menores taxas de desgaste da ferramenta, apesar de uma dureza 16 % maior, quando comparada ao mesmo material fundido.

De Assis et al. (2020) investigaram a microusinagem de aço inoxidável 316L fabricado por PBF, a fim de identificar a influência dos parâmetros: diâmetro da microferramenta, trajetória, avanço por dente e fresamento concordante / discordante no acabamento superficial de cada microcanal. Para isso, utilizaram microfresas de topo de metal duro sem revestimento, com diâmetros de 600  $\mu\text{m}$  e 800  $\mu\text{m}$ , velocidade de corte de 60,3 m/min e 80,4 m/min, avanço por dente de 0,5 - 3,0 mm/dente e profundidade de corte de 100  $\mu\text{m}$ . Na Fig. 2.28 podem ser observados os resultados das diferentes rugosidades, medidas no centro do canal, das quais os autores concluíram que a microferramenta de maior diâmetro proporcionou maior qualidade superficial, apresentando menores valores de rugosidade e menor formação de rebarbas. Eles observaram um equilíbrio entre os valores de  $R_p$  e  $R_v$ , confirmados por valores de assimetria ( $R_{sk}$ ) próximos a zero, o que indica boa simetria entre os picos e vales. A região central apresentou ainda valores de  $R_{ku}$  abaixo de 3, indicando que a superfície possui poucos picos altos e vales baixos.

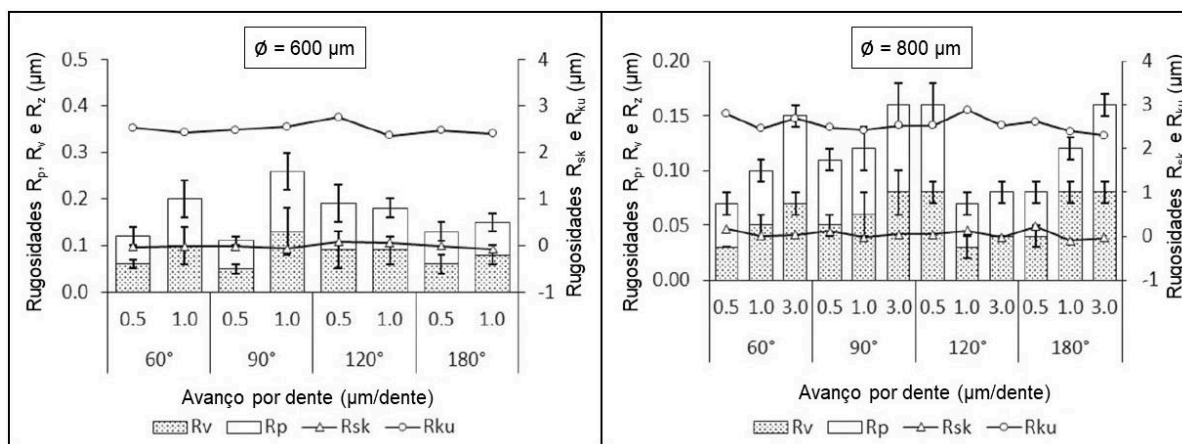


Figura 2.28 - Gráficos de parâmetros de rugosidade  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_{sk}$  and  $R_{ku}$  (Adaptado de DE ASSIS et al. 2020).

Os autores observaram ainda que as maiores rebarbas foram formadas quando utilizado o maior valor de avanço por dente (3,0 mm/ dente), a trajetória do caminho da ferramenta influenciou estatisticamente apenas na usinagem com as microferramentas de menor diâmetro, sendo estas mais sensíveis à anisotropia causada pelo processo PBF nas peças de aço inoxidável 316L (DE ASSIS et al. 2020).

Coelho, Azevedo e Assis (2018) realizaram experimentos semelhantes ao anterior, utilizando como material o aço inoxidável 316L fabricado por PBF, com o objetivo de investigar alguns aspectos relacionados à anisotropia de peças MA. Para isso, o

microfresamento foi realizado alterando a direção da trajetória da ferramenta em ângulos específicos (30°, 90°, 120° e 180°). Eles concluíram através da análise de variância (ANOVA) que o aumento do avanço por dente proporcionou uma superfície mais lisa, com picos e vales equilibrados ao longo das superfícies usinadas e também que, a mudança da direção de corte causou uma variação dos valores de rugosidade medidos, confirmando a anisotropia causada pelo processo MA. Em função disso, recomendaram a consideração da orientação da peça no microfresamento, para se obter melhores superfícies usinadas.

Kuriakose et al. (2018) estudaram a microusinagem de aço inoxidável 316L com ligante polimérico (Embemould K83), fabricado por ME. Tinham como objetivo, avaliar a influência dos parâmetros de corte e os efeitos da temperatura da peça na usinagem a verde (à temperatura ambiente). Foram utilizadas microfresas de metal duro com revestimento AlCrN, diâmetro de 1mm, velocidade de corte entre 17,5 – 35 m/min, profundidade de corte 0,25 e 0,5 mm, avanço por dente entre 0,015 – 0,05 mm/dente. Os autores concluíram que o microfresamento com a peça aquecida em torno de 45°C apresentou melhor qualidade superficial, com menores valores de rugosidade. No entanto, os parâmetros de corte mais baixos foram considerados apropriados para a microusinagem de peças fabricadas por ME com aditivos, em estado verde. Eles concluíram também que, o aumento da profundidade de corte e do avanço, influenciam diretamente no aumento da força de corte, sendo essa menor para o microfresamento no estado verde e aumentadas em torno de 20% quando a peça é aquecida.

Parenti et al. (2017) também investigaram a microusinagem de aço inoxidável 316L fabricado por ME em estado verde, utilizando microfresas de 0,5 mm de diâmetro. As forças de corte medidas foram baixas e muito sensíveis às variações dos parâmetros de corte, evidenciando os diferentes mecanismos de corte envolvidos na microfresagem desse material. A usinabilidade das peças verdes foi considerada limitada, em função da rugosidade alcançável e dos danos ocorridos nas bordas dos canais. No entanto os autores ressaltaram que melhores resultados poderiam ser alcançados, com a combinação adequada dos parâmetros de corte. Em um estudo posterior, utilizando o mesmo material Parenti et al. (2019) concluíram que o mesmo apresentou boa usinabilidade, com baixas forças de corte, sendo uma opção viável para melhorar o acabamento superficial e obter características finas com dimensões precisas. Eles ressaltaram ainda, que o processo pode ser considerado uma solução tangível para a produção em escala industrial, dentro da abordagem da fabricação híbrida.

Gomes, Da Silva e Duarte (2020) analisaram o microfresamento de uma amostra de aço inoxidável austenítico 316L fabricado por DED, através da investigação do desgaste das microferramentas, formação de rebarbas e rugosidade superficial. Para isso, utilizaram

ferramentas de meta duro com revestimento (Al,Ti)N, diâmetro de 400  $\mu\text{m}$ , com duas arestas de corte, velocidade de corte de 12,7 m/min, avanço por dente de 5  $\mu\text{m}/\text{dente}$  e profundidade de corte 40  $\mu\text{m}$ . Eles concluíram que o comportamento de desgaste das microferramentas em função do comprimento usinado é semelhante ao desgaste das macroferramentas, apresentando inclusive os mesmos mecanismos de desgaste. As rebarbas do lado concordante são maiores do que as do lado discordante, com tendência a diminuição ao longo do comprimento usinado. Eles concluíram ainda, através de análise estatística que, a velocidade de corte foi o único parâmetro que influenciou os valores de rugosidade e que os valores de Ra variaram entre 0,1241 a 0,3206  $\mu\text{m}$ , para todas as condições de corte.

A microusinagem de outros materiais produzidos por por MA também foram investigados, como por exemplo Allegri et al. (2019) estudaram o Co–Cr–Mo produzido por SLM, utilizando microfresas de metal duro, 508  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Eles concluíram que: a força de corte não é afetada pela profundidade de corte; que rugosidades muito baixas podem ser obtidas, no entanto, a profundidade mínima de corte deve ser 40% do raio da aresta de corte; que o comprimento total do cavaco tende a crescer linearmente à medida que o avanço por dente aumenta e através de análises de microdureza observaram um fenômeno de endurecimento da superfície, ligado diretamente ao avanço por dente.

Rysava e Bruschi (2016) realizaram o microfresamento de peças de Ti6Al4V fabricadas por EBM e DMLS, com ferramentas de metal duro, sem revestimento, diâmetro 300  $\mu\text{m}$  e constataram que: a rugosidade (em ambas as amostras) foi maior para os menores valores de avanço por dente, devido à presença predominante de sulcamento; em todas as condições de corte e amostras foram observadas a presença de arestas postiças de corte (APC); o avanço por dente é inversamente proporcional à formação de rebarbas.

Khaliq et al. (2020) realizaram a microusinagem de Ti6Al4V, produzido por SLM, com ferramentas de metal duro, diâmetro de 500  $\mu\text{m}$  em condições a seco e MQL. Concluíram que: os menores valores de rugosidade foram obtidos quando se utilizou a maior velocidade de corte; o valor da rugosidade é inversamente proporcional à velocidade de corte e diretamente proporcional ao avanço por dente e que a rugosidade diminuiu em até 55% com a usinagem utilizando MQL.

Portanto, conclui-se que apesar da vasta aplicação e popularidade do aço inoxidável 316L (obtido através de técnicas convencionais), de alguns trabalhos estudando a obtenção do mesmo por processos de MA, bem como as suas respectivas microusinagens, não foram encontrados trabalhos que mencionassem especificamente a microusinagem do aço inoxidável 316L SLM, comparando diferentes técnicas de varredura do *laser*, com diferentes revestimentos, nas condições a seco e MQL. Diante disso, este trabalho se torna justificado por compreender um estudo mais aprofundado para domínio do processo e todas as suas

particularidades, antes que se possa produzir em escala industrial produtos confiáveis e econômicos.

No entanto, para as próximas décadas espera-se um rápido desenvolvimento e melhoria nas capacidades de processo da MAM, reforçando o fato de que esta continua a ser a tecnologia do futuro, pois as pessoas continuam dependendo da qualidade e da facilidade de uso dos produtos fabricados por MA nos diversos setores de manufatura, transporte, medicina, esportes, eletrônica, entre outros (OLAKANMI, COCHRANE e DALGARNO, 2015).

# CAPÍTULO III

## METODOLOGIA

Neste capítulo, serão fornecidas as informações sobre os procedimentos experimentais e a metodologia utilizada para investigação da usinabilidade de duas amostras distintas de aço inoxidável 316L, fabricadas por fusão seletiva a *laser* (SLM).

O processo escolhido para execução dos ensaios foi o microfresamento de topo, através da fabricação de microcanais, utilizando ferramentas com revestimentos de TiAlN, AlCrN, DLC e TiN, comparadas a ferramentas sem revestimento.

Ao longo deste serão informados também, detalhes sobre: o material da peça e a preparação das amostras, máquina-ferramenta e microfresa, fixação e preparação das amostras, os experimentos de usinagem a seco e com fluido de corte, seus parâmetros, bem como as variáveis de saída (desgaste das ferramentas, qualidade superficial, formação de rebarba e formação de cavaco) e recursos utilizados para obtenção e suas respectivas metodologias de medição.

### 3.1. Caracterização do material

As amostras utilizadas nos experimentos foram produzidas na Texas A&M University dos Estados Unidos e doadas ao laboratório de ensino e pesquisa em usinagem (LEPU). Os blocos de aço inoxidável 316L (20 mm x 10 mm x 13 mm) foram impressos aditivamente por fusão a *laser* em leito de pó, no equipamento AM250 da fabricante Renishaw. O pó do aço 316L (50 µm de diâmetro médio) foi fundido com um *laser* YAG (ítrio-alumínio-granada) a 160 W de potência, incubação em gás argônio de 110 µm de distância. Amostras distintas foram obtidas através da utilização de diferentes estratégias de varredura do *laser*:

- Blocos S fabricados utilizando a estratégia Stripe, onde o *laser* varre a superfície de pó depositada na direção alternada de 67° a cada camada adjacente, conforme observado na Fig. 3.1.a;

- Blocos C fabricados utilizando a estratégia Chess, onde pequenos quadrados (lembrando um tabuleiro de xadrez) são impressos de forma alternada em cada camada, Fig. 3.1.b.

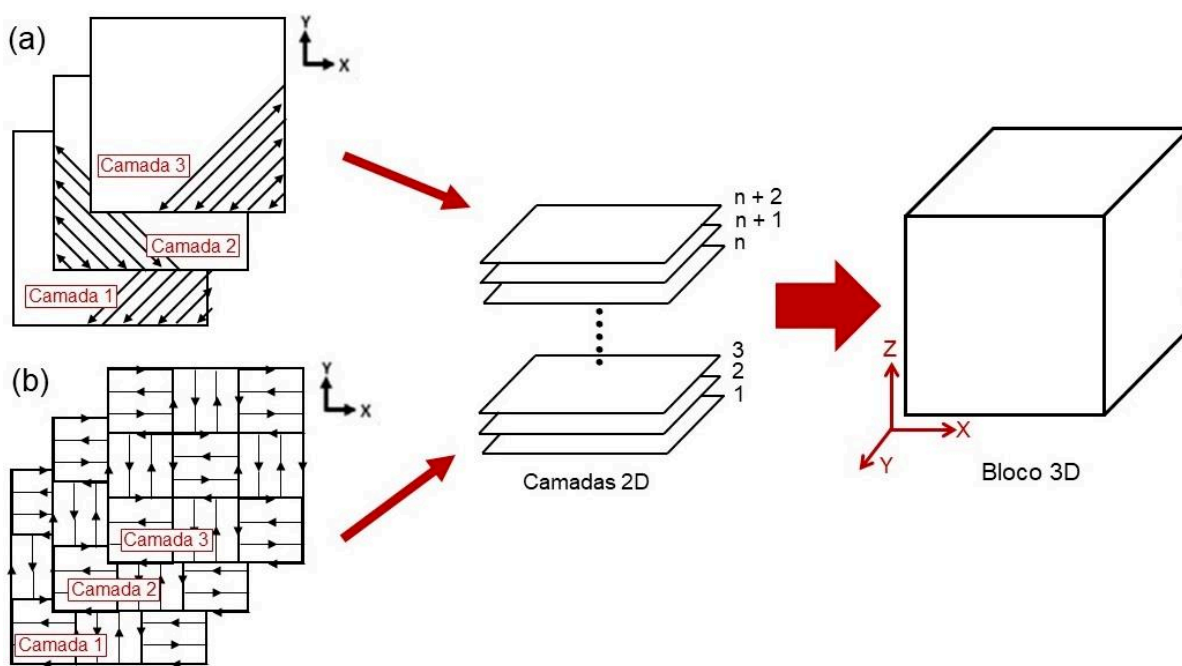


Figura 3.1 - Estratégias de impressão, em (a) Stripe; (b) Chess.

A superfície da base retangular de 20 mm x 10 mm foi impressa no plano xy de varredura e 13 mm impressos na direção no plano z, ou seja, referente à altura. Cada camada foi impressa com espessura de 50  $\mu\text{m}$  e todas as amostras separadas da plataforma da máquina através de corte realizado perpendicularmente ao eixo z, utilizando usinagem por eletroerosão a fio (EDM-F). Todas as amostras foram prensadas isostaticamente a quente (HIP) a 175 MPa, com temperatura de 1 180 °C.

Na Tab. 3.1 apresentada a composição química do pó de aço inoxidável 316L utilizado na fabricação das amostras por SLM, fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.1 - Composição química do pó de aço inoxidável 316L (RENISHAW, 2018).

Elemento	Massa (%)
Ferro	Balanceado
Cromo	16 a 18
Níquel	10 a 14
Molibdênio	2 a 3
Manganês	≤ 2
Silício	≤ 1
Nitrogênio	≤ 0,10
Oxigênio	≤ 0,10
Fósforo	≤ 0,045
Carbono	≤ 0,03
Enxofre	≤ 0,03

Foram realizadas análises por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) a fim de verificar a composição química das amostras. Para esta análise utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) disponível no Laboratório Multiusuário de Microscopia (LMM) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, marca Tescan, modelo LMU - Vega 3, EDS INCA x-act modelo 51-ADD007, com tempo de aquisição de 30 s, tempo de processamento de 4 s e tensão de aceleração de 20 kV. Nas figuras 1 e 2, pode-se observar os resultados obtidos, constatando que em sua grande maioria, os componentes presentes nos resultados de concentração aparente são condizentes com a composição do pó de aço inoxidável 316L fornecida pelo fabricante, com destaque apenas para a quantidade de cromo um pouco acima do informado (em média aproximadamente 2 %). Ressalta-se também que a presença de oxigênio é desconsiderada devido à ineficiência do MEV em formar um vácuo perfeito e que a presença de uma concentração aparente considerável de carbono também é devido à imprecisão do sistema na detecção deste elemento químico.

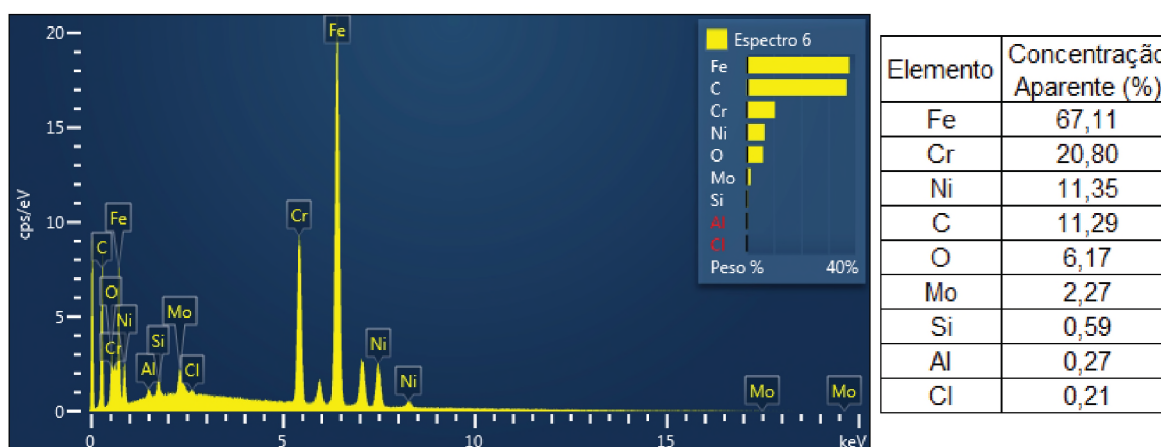


Figura 3.2 - Composição química bloco S.



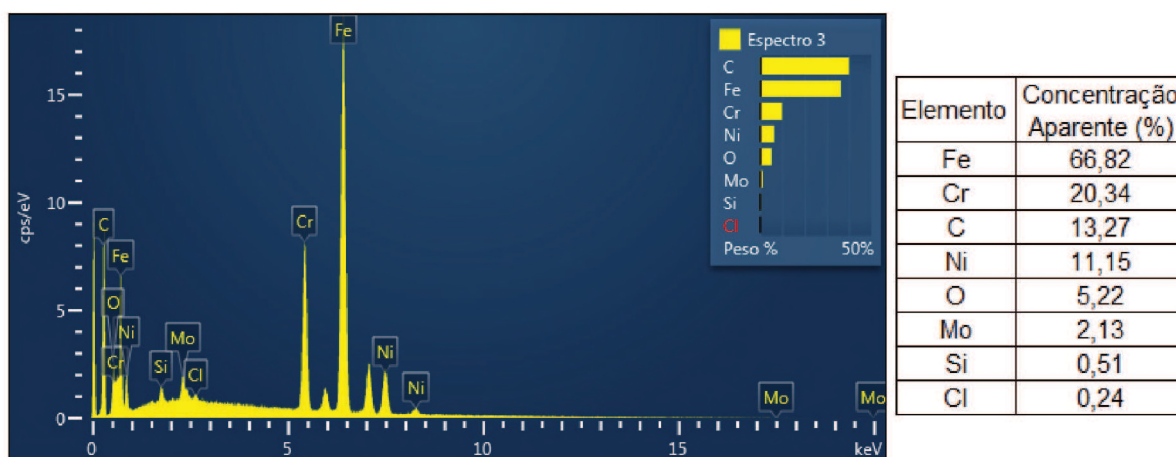


Figura 3.3 - Composição química bloco C.

Foi realizada a análise metalográfica das duas amostras na lateral (eixo z,x) e na superfície de topo (eixo x,y) no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da UFU. Para tanto, foi realizado o procedimento de lixamento com sequência de lixas da granulometria mesh de # 220 a 2 200 (fabricante 3M), polido com a utilização de óxido de cromo de 5  $\mu\text{m}$  e alumina de 0,3  $\mu\text{m}$  e as superfícies atacadas por meio da imersão por 40 segundos no reagente *Kalling* nº 2. A microestrutura das amostras foi obtida através de microscópio óptico e o *software Image - Pro Plus*, conforme apresentado na Fig. 3.4 e Fig.3.5.

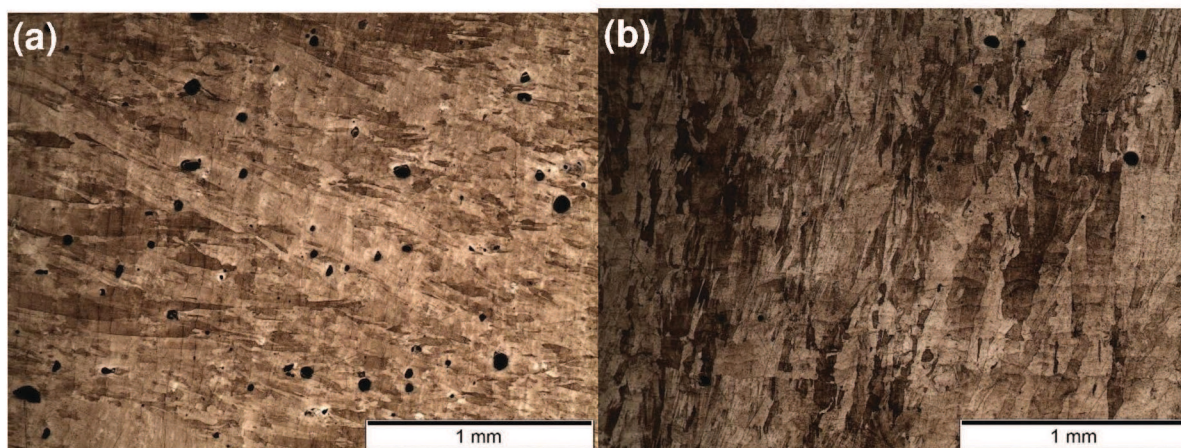


Figura 3.4 - Microestrutura amostras, em (a) Topo Bloco S e (b) Topo Bloco C.

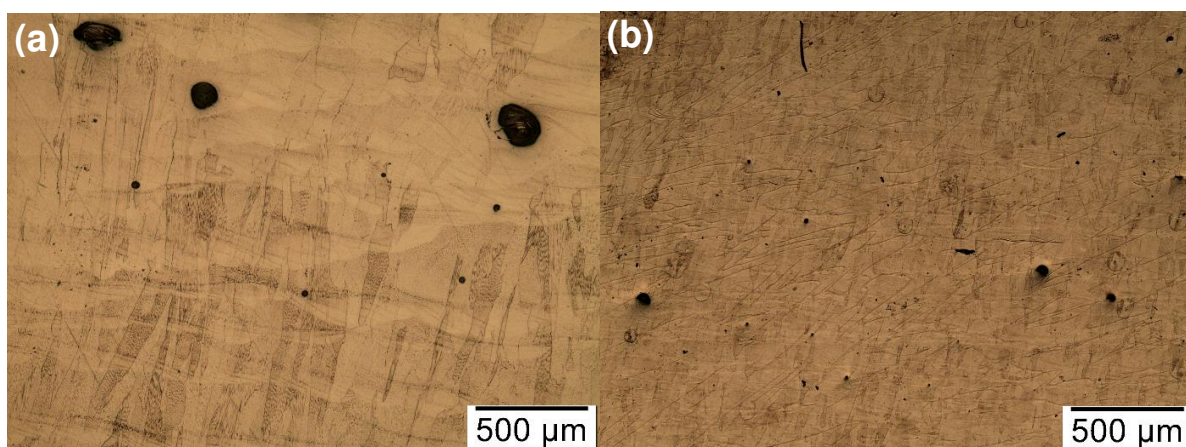


Figura 3.5 - Microestrutura amostras, em (a) Lateral Bloco S e (b) Lateral bloco C.

Observa-se que a microestrutura das diferentes amostras são completamente diferentes do aço inox 316L obtido através dos processos convencionais de fabricação (Fig. 3.6) e também diferentes entre si em função do tipo de deposição e varredura do *laser* para fusão do pó.

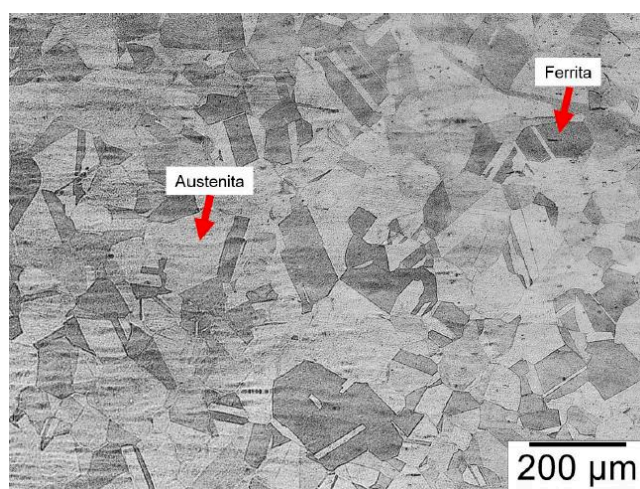


Figura 3.6 - Microestrutura do aço inoxidável 316L, obtido através de processo convencional de fabricação (GOMES, 2019).

Comparando as imagens de topo (Fig 3.4(a) e Fig 3.4(b)) com o aço inox 316L convencional (Fig. 3.6) percebe-se que a Ferrita (fase escura) se mistura de forma mais homogênea e alongada na matriz austenítica (fase clara), porém nas imagens laterais essa divisão não é tão clara. É possível observar ainda a presença de porosidades (pontos pretos) característicos do processo fabricação SLM.

Ressalta-se ainda, que o ajuste de todos os parâmetros da fabricação SLM, tais como: potência do *laser*, diâmetro e ajuste do feixe, velocidade de varredura, espessura da



camada, espaçamento de hachura e até as características do pó metálico e procedimento de manipulação do mesmo, são considerados desafios que induzem a várias imperfeições ou características nos componentes obtidos através deste processo. Na Fig. 3.7 é possível a observação de alguns destes.

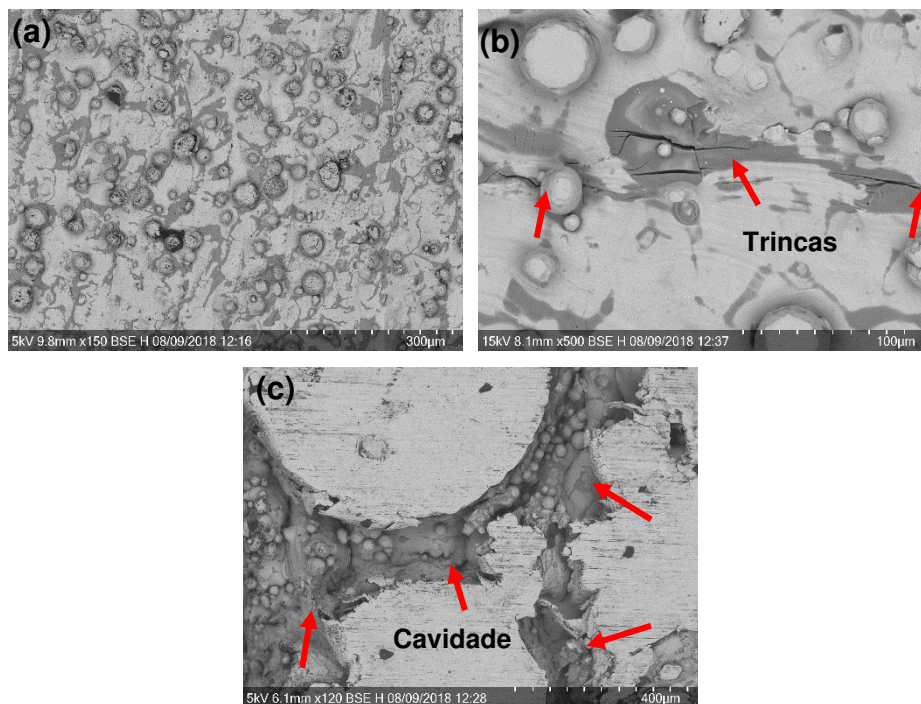


Figura 3.7 - Imperfeições das amostras obtidas através processo de fabricação SLM, em (a) superfície rugosa devido a fusão parcial do pó, (b) trincas e (c) cavidade em superfície seccionada pelo microfresamento.

Foi observado ainda nas microestruturas laterais uma quantidade muito grande de porosidades, principalmente a partir da metade inferior das amostras até a sua base (começo da impressão), conforme observado na Fig. 3.8. Foi possível observar ainda, que quando comparadas as duas amostras (por inteiro), o Bloco S apresenta quantidade superior de porosidades.

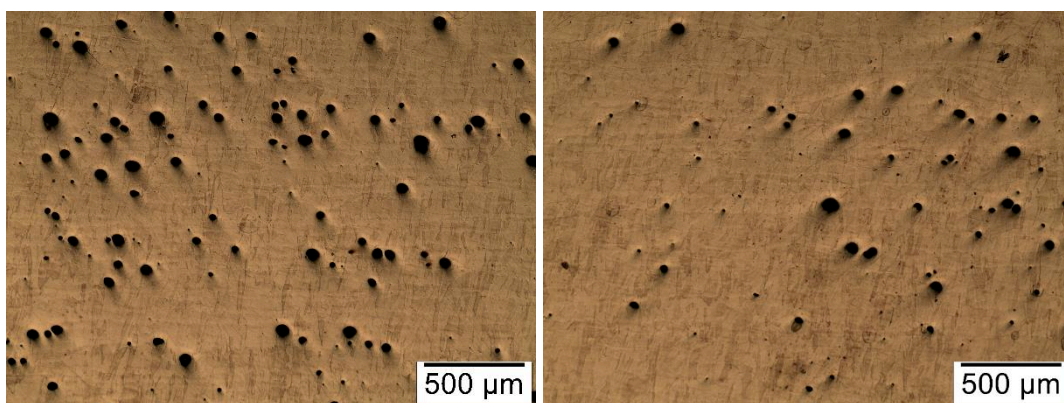


Figura 3.8 - Microestrutura lateral das amostras, em (a) Bloco S; (b) Bloco C.

Destaca-se que as porosidades são uma característica indesejada ao processo, visto que estas impactam diretamente, prejudicando as propriedades mecânicas do componente final desejado. Na Figura 3.9 pode ser observado um poro encontrado no Bloco C com diâmetro aproximado de  $34\ \mu\text{m}$ , cerca de 85 % da dimensão da profundidade de corte utilizada nos ensaios ( $40\ \mu\text{m}$ ).

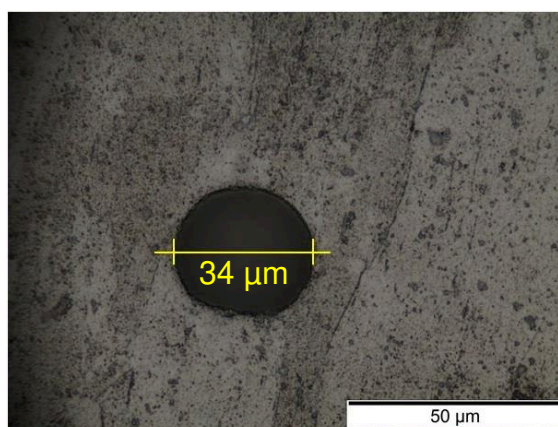


Figura 3.9 - Porosidade no bloco C.

É importante ainda ressaltar que, os microporos podem ser minimizados ajustando os parâmetros do processo SLM, melhorados com o tratamento térmico subsequente ou efetivamente por pressão isostática a quente (HIP), no entanto, o estudo destes efeitos não será contemplado neste trabalho, apenas a influência dos poros no processo de corte e na qualidade do canal.

### 3.2. Fixação e faceamento das amostras

Devido às pequenas dimensões envolvidas na microusinagem, torna-se crucial uma preparação mais criteriosa das amostras a serem utilizadas nos experimentos, a fim de garantir baixos desvios de planeza e perpendicularidade (inferiores à do processo).

Para fixação das amostras foi utilizada a metodologia de fixação desenvolvida por Oliveira (2019) conforme demonstrado na Fig. 3.10, onde a amostra foi fixada em uma base retificada, com a utilização de resina epóxi e este conjunto prensado em uma morsa de precisão, permanecendo assim por um tempo médio de 12 horas, até a cura completa da resina. Desta forma, foi possível garantir que a superfície a ser fresada estivesse paralela à superfície inferior da base retificada, conseqüentemente também paralela a mesa de fixação da máquina ferramenta.

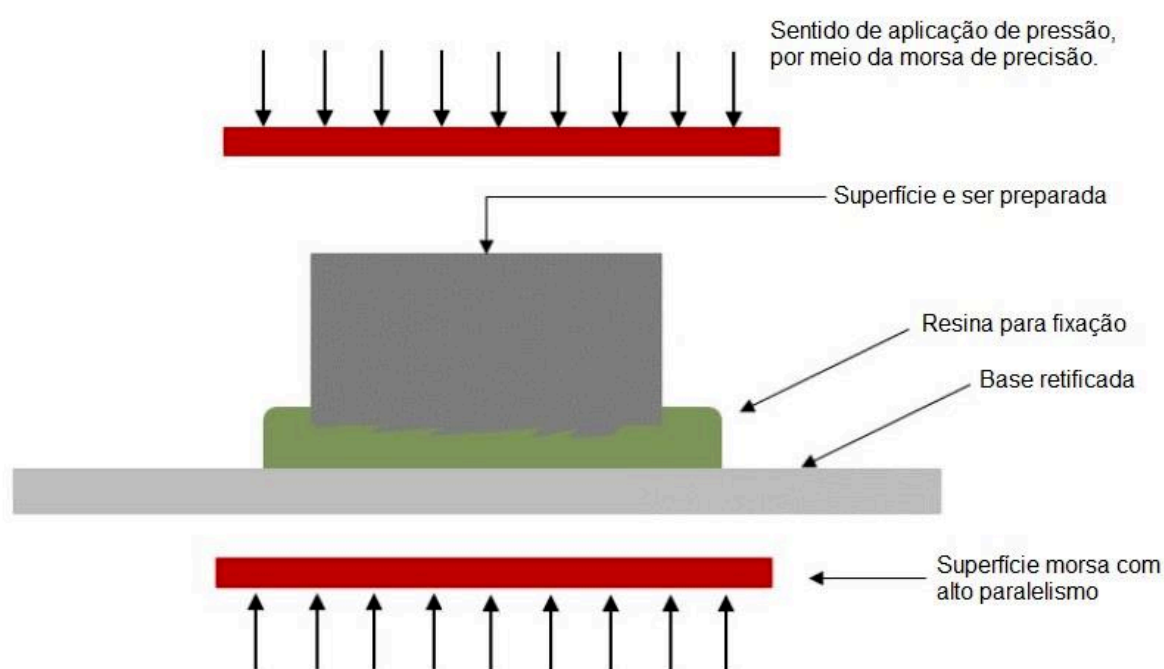


Figura 3.10 - Metodologia de fixação das amostras (adaptado de OLIVEIRA, 2019).

Na Figura 3.11 é possível observar uma amostra do Aço Inoxidável 316L SLM – Bloco S, fixada na base retificada e posteriormente parafusada à mesa da microfresadora.

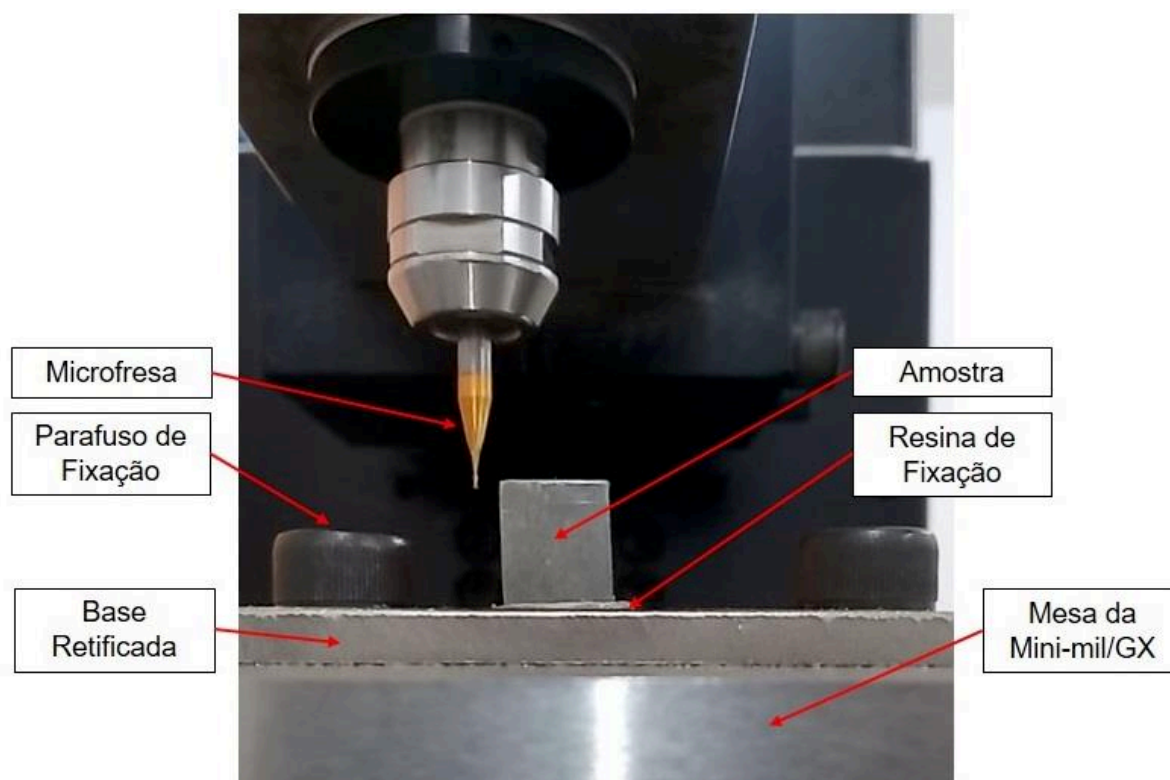


Figura 3.11 - Fixação da amostra e preparação para microusinagem.

A fim de eliminar a superfície altamente rugosa, característica do processo SLM e garantir também um pequeno desvio de perpendicularidade, as superfícies das amostras foram fresadas previamente na mesma microfresadora CNC que foi utilizada para os experimentos, utilizando fresas de metal duro de 3 mm de diâmetro e 4 arestas de corte, fabricadas pela OSG. Na Tabela 3.2 a seguir são apresentados os parâmetros de corte utilizados nesta etapa da preparação.

Tabela 3.2 - Parâmetros de corte utilizados para preparação das amostras.

Rotação (rpm)	Velocidade de corte (m/min)	Avanço/dente ( $\mu\text{m}/\text{dente}$ )	Velocidade de avanço (mm/min)	Profundidade de corte ( $\mu\text{m}$ ) <b>*Variável</b>
5 000	47,1	5	50	5 $\mu\text{m}$ (desbaste), 3 $\mu\text{m}$ (até nivelamento completo), 2 $\mu\text{m}$ e 1 $\mu\text{m}$ (passes de acabamento)

Para a verificação do nivelamento ao longo do comprimento longitudinal (direção x na microfresadora) e transversal (direção y na microfresadora) da superfície, foi utilizado um relógio comparador analógico com resolução de 1  $\mu\text{m}$ , do fabricante Mitutoyo®, mostrado na Fig. 3.12. Para ambas as amostras, o desvio encontrado tanto longitudinal, quanto transversal foi de 0,5  $\mu\text{m}$  (medido com interpolação), sendo considerado adequado ao

experimento. Ressalta-se também que a amostra não foi retirada da máquina ao longo dos ensaios.

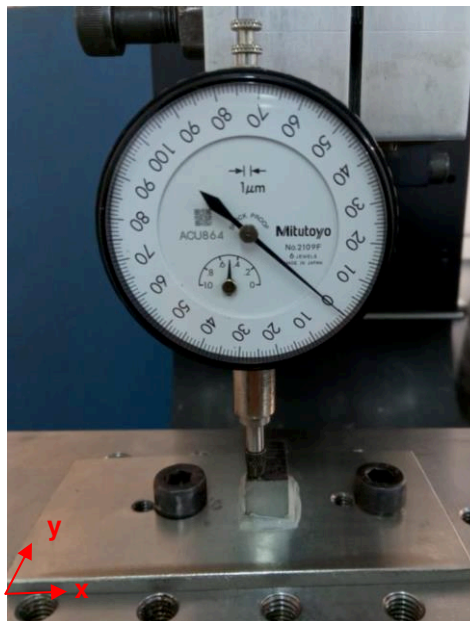


Figura 3.12 - Verificação do nivelamento da superfície.

### 3.3. Caracterização das ferramentas

Para realização dos ensaios, foram utilizadas microferramentas de metal duro sem revestimento e com outros quatro tipos de revestimento diferentes, fabricadas pela empresa Performance Micro Tools®. Estas possuem diâmetro de 396  $\mu\text{m}$  (0,0156") com tolerância de + 0,00 – 0,05 mm (sem revestimento), lembrando que os revestimentos utilizados não estão disponíveis comercialmente, sendo depositados sob a ferramenta já pronta (sem revestimento), feitos por encomenda para este trabalho. Na Figura 3.13 são apresentadas imagens de uma das microfresas utilizadas e os parâmetros geométricos fornecidos pelo fabricante.



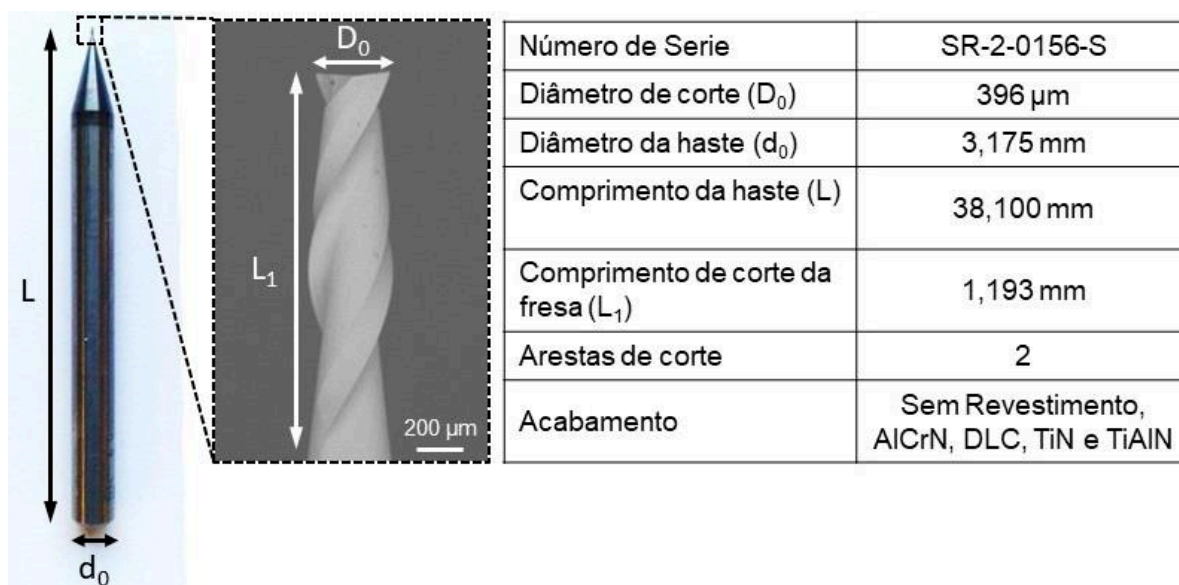


Figura 3.13 - Parâmetros geométricos e detalhes das microfresas (Adaptado de PERFORMANCE MICRO TOOLS, 2012).

Para caracterização das microferramentas, verificação da integridade e posterior medição do desgaste, foram obtidas imagens das ferramentas novas, utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca HITACHI modelo TM3000. Na etapa de análise dos resultados, quando necessário uma melhor resolução ou maiores ampliações, foi utilizado também o MEV do fabricante ZEISS, modelo EVO MA10, do Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) da Faculdade de Engenharia Química da UFU.

Ressalta-se a importância de uma análise prévia das ferramentas, visto que desvios em relação a forma ideal e defeitos gerais (de fabricação ou manipulação) são comumente encontrados neste tipo de ferramenta. Na Figura 3.14 é possível observar uma ferramenta de metal duro, com revestimento TiAlN, onde foi constatado (através deste procedimento) um desvio de forma na ferramenta nova, antes que esta fosse utilizada nos ensaios. Lembrando que, a fim de garantir igualdade, possibilitando a futura comparação dos resultados, as ferramentas com estas não conformidades são descartadas, gerando transtornos devido à dificuldade de substituição das mesmas.



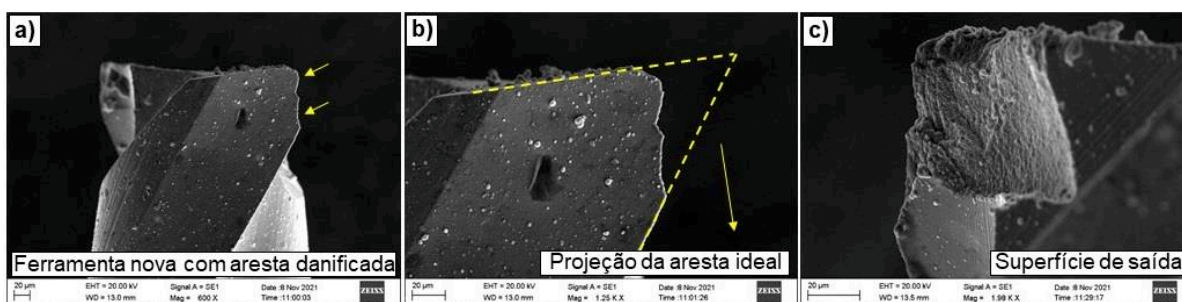


Figura 3.14 - Ferramenta nova de metal duro com revestimento de TiAlN: (a) detalhe da aresta danificada; (b) projeção da aresta considerada ideal; (c) imagem da superfície de saída da aresta danificada.

As características típicas das microferramentas utilizadas nos ensaios podem ser observadas nas imagens da Fig. 3.15, destacando as superfícies principal e secundária de folga e a superfície de saída. Nota-se também o detalhamento da medição do raio de aresta de corte das microfresas ( $r_\epsilon$ ), medidos por meio do *software Image J* a partir das imagens das microfresas obtidas no MEV, onde as microfresas sem revestimento possuem  $r_\epsilon$  médio de aproximadamente  $1,1 \mu\text{m}$  e as ferramentas com revestimento em média aproximadamente  $1,7 \mu\text{m}$ .

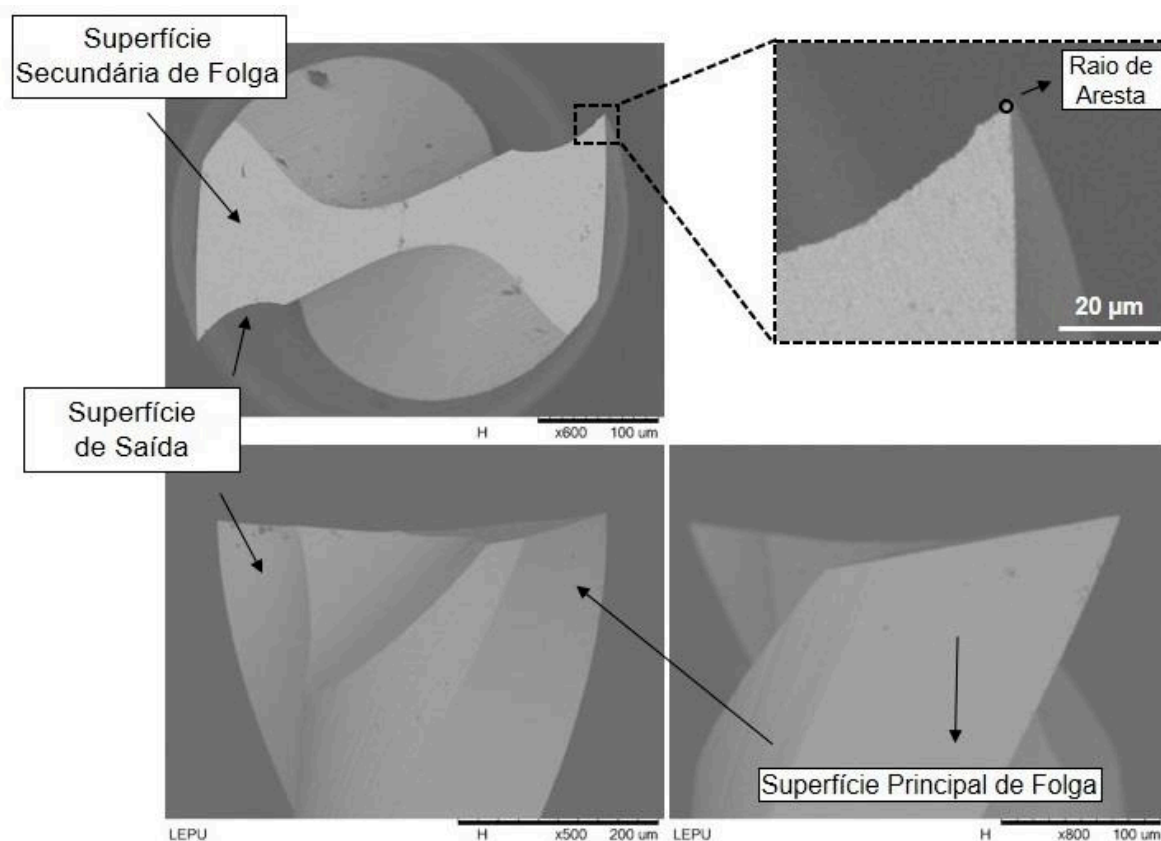


Figura 3.15 - Características típicas das microfresas utilizadas.

### 3.4. Realização dos experimentos

Para a realização dos microcanais foi utilizada a microfresadora Mini-mill/GX do fabricante Minitex Machinery Corporation com 3 eixos lineares, rotação máxima do eixo árvore 60 000 rpm, por meio de um motor elétrico Nakanishi modelo EM-3060. Os eixos X, Y e Z possuem deslocamento máximos de 300 mm, 228 mm e 228 mm respectivamente, com resolução de posicionamento de 0,1  $\mu\text{m}$ . O Comando Numérico Computadorizado, utilizado para controlar a microfresadora, é feito através do *software* Mach3Mill. Esta está apoiada em uma base de granito e mesa inercial, projetada para evitar que as vibrações mecânicas provenientes do ambiente externo interfiram na execução dos ensaios, garantindo rigidez ao sistema.

Para o posicionamento da ferramenta foi necessária atenção especial, devido às pequenas dimensões envolvidas e a ausência de um recurso que realizasse esta etapa de maneira automática. Primeiramente a microfresa era aproximada visualmente da amostra de forma estática, logo em seguida era realizada uma aproximação dinâmica, através de uma programação por comando numérico, onde a microfresa em movimento se aproximava da amostra na direção axial com  $a_p$  de 0,1  $\mu\text{m}$  (menor avanço possível da máquina), retornando à posição inicial de maneira automática. A cada ciclo este processo era repetido, até que a ferramenta tocasse a amostra produzindo uma marca característica visível a olho nu, no entanto com  $a_p$  menor que 0,1  $\mu\text{m}$ , conseqüentemente erro de posicionamento também nesta faixa. O processo de referenciamento da microfresa é, portanto, uma etapa crítica do processo, muito demorada e delicada, onde um pequeno erro de movimentação ou mínima falta de atenção, pode comprometer uma sequência de trabalho.

Os ensaios consistiram na usinagem de microcanais, paralelos entre si, em ambas as amostras S e C, na direção longitudinal (x), avanço da esquerda para direita, com comprimento de 10 mm, espaçamento entre os eixos dos canais de 0,8 mm e tempo de usinagem de aproximadamente 10 seg por canal. Para cada ensaio/condição de usinagem, foi utilizada uma nova ferramenta e usinados 7 canais, totalizando 70 mm de comprimento usinado. Estes ensaios foram feitos na condição a seco e com aplicação de mínima quantidade de lubrificação (MQL), para comparação do desgaste entre as microferramentas, da formação de rebarbas, da qualidade superficial, da rugosidade do canal e das características dos cavacos. As condições de corte utilizadas são mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Condições de usinagem utilizadas.

Amostra	Ensaio	Ferramenta	Condição	n (rpm)	v <sub>c</sub> (m/min)	f <sub>z</sub> (μm/dente)	a <sub>p</sub> (μm)	a <sub>e</sub> (μm)	N° de canais
<b>S</b>	1	Sem revestimento	Seco	30 000	37,3	1	40	396	7
	2	TiN							7
	3	AlCrN							7
	4	TiAl							7
	5	DLC							7
	6	Sem revestimento	Com fluido de corte						7
	7	TiN							7
	8	AlCrN							7
	9	TiAl							7
	10	DLC							7
<b>C</b>	11	Sem revestimento	Seco	30 000	37,3	1	40	396	7
	12	TiN							7
	13	AlCrN							7
	14	TiAl							7
	15	DLC							7
	16	Sem revestimento	Com fluido de corte						7
	17	TiN							7
	18	AlCrN							7
	19	TiAl							7
	20	DLC							7
<b>Total Canais</b>									<b>140</b>

Para os ensaios realizados com aplicação de fluido de corte pela técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), utilizou-se pressão de ar de 33 psi (0,23 MPa) e vazão de 40,7 ml/h.

Cabe ressaltar que não existe na literatura específica de microusinagem, um consenso ou uma norma estabelecendo uma faixa de valores de vazão considerada MQL. Os trabalhos que mencionam esta técnica, normalmente trazem valores padronizados em operações de macro usinagem, como por exemplo a norma DIN 69090-1 (2011) que indica uma vazão de 50 ml/h, podendo chegar a 150 ml/h em alguns casos, ou ainda, de acordo com Walker (2013), vazões inferiores a 250 ml/h. Em trabalhos de microusinagem, o termo MQL é utilizado para definir a técnica em uma ampla variação de faixa de vazões, como por exemplo: Aslantas e Cicek (2018) utilizaram 10 ml/h; Vazquez et al. (2015) utilizaram 80 ml/h; Uzun et al. (2013) e Aslantas et al. (2016) utilizaram 150 ml/h; De Oliveira (2019) utilizou 270 ml/h, adotando o termo MQL em analogia ao processo macro, porém observou que na prática, devido às proporções do processo este poderia ser comparado ao método convencional (fluido em abundância). Neste trabalho, apesar de em alguns momentos ser observado na zona de corte e sob os canais realizados uma quantidade grande de fluido, também será adotado o termo MQL como convenção.

Foi utilizado o fluido de corte integral Coolube 2210EP com composição própria fabricada pela empresa UNIST, este fluido possui ponto de fulgor superior às temperaturas esperadas para o processo de microusinagem (em torno de 200 °C) e é considerado não prejudicial ao operador. A pressão utilizada é considerada suficiente para que a velocidade do jato exceda a velocidade de corte da ferramenta, a fim de assegurar a utilização adequada do lubrificante na zona de corte (LI et al., 2015). A Figura 3.16 ilustra o posicionamento do bocal realizado na direção do avanço. Este foi fixado ao eixo principal da microfresadora, sendo deslocado juntamente com a ferramenta, o que permite uma lubrificação constante durante todo o período de usinagem.

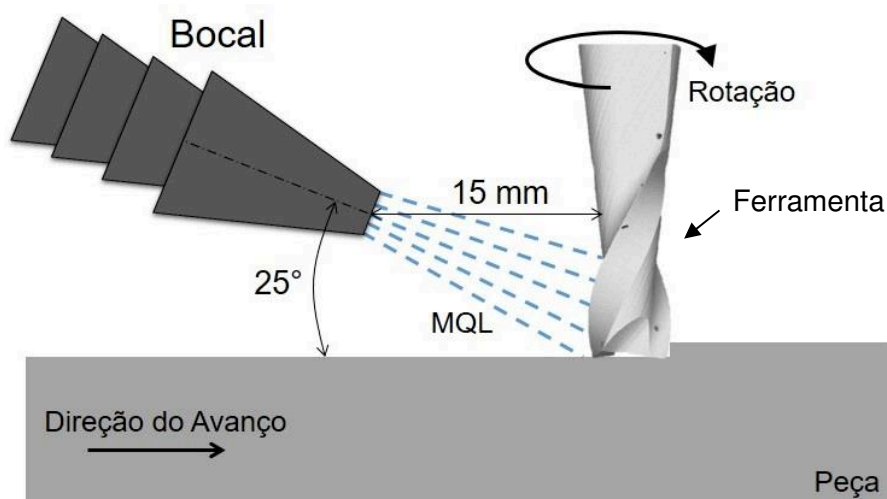


Figura 3.16 - Posicionamento do bocal em relação a microfresa.

### 3.5. Análise das variáveis de saída

Neste item serão apresentados os métodos, equipamentos e parâmetros utilizados para análise e obtenção das variáveis de saída.

#### 3.5.1. Desgaste das ferramentas

Todas as ferramentas utilizadas nos ensaios foram primeiramente verificadas através da utilização de MEV para confirmação de sua integridade, visto que estas possuem dimensões e geometria impossíveis de observar a olho nu. Para acompanhamento da evolução do desgaste das ferramentas ao longo dos ensaios, primeiramente foram obtidas imagens de topo (superfície secundária de folga) e para análise dos mecanismos de desgaste, foram feitas imagens da superfície de saída e da superfície principal de folga. Este procedimento foi repetido sempre após a realização do

primeiro canal (10 mm usinados) e depois deste, a cada 2 canais usinados (20 mm usinados). A fim de possibilitar a comparação, as imagens das ferramentas usadas foram obtidas nas mesmas posições e escala das ferramentas novas.

Para a medição do desgaste, o perfil da ferramenta nova foi desenhado sobre a imagem de topo da ferramenta e uma circunferência foi traçada para a obtenção do diâmetro real da mesma, visto que esta possui tolerância de fabricação especificada pelo fabricante (+ 0,00 – 0,05 mm) conforme Fig. 3.17 (a). Este perfil foi copiado para imagem da ferramenta desgastada e utilizado como parâmetro para ajuste, posicionamento e rotação se necessários (Fig. 3.17 - b), tendo em vista a impossibilidade de se obter imagens exatamente iguais, mesmo se tratando da mesma ferramenta.

Uma nova circunferência foi traçada e o desgaste medido por meio da redução do diâmetro da ferramenta, conforme pode ser observado no exemplo da Fig. 3.17 (c). Este procedimento foi repetido três vezes para cada condição medida, afim de abranger situações divergentes na ponta da ferramenta desgastada, como por exemplo o acúmulo de material de forma irregular e o resultado será apresentado com o respectivo desvio padrão no intervalo de confiança de 95,45 %. Para estas medições, utilizou-se o *software ImageJ 1.43u* calibrado com a escala disponibilizada nas próprias imagens obtidas pelo MEV.

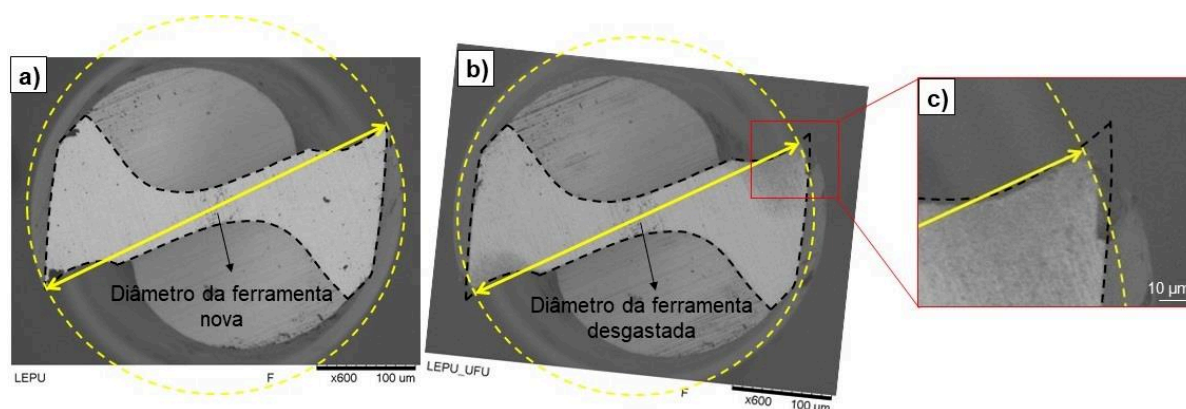


Figura 3.17 - Exemplo da medição de desgaste, em (a) medição do diâmetro na ferramenta nova, (b) medição do diâmetro na ferramenta desgastada, (c) detalhe da diferença entre o diâmetro da ferramenta desgastada e o perfil da ferramenta nova traçada anteriormente.

### 3.5.2. Qualidade Superficial

Vários parâmetros de usinagem influenciam diretamente a qualidade do acabamento superficial, tais como: geometria da ferramenta de corte, propriedades da peça, rigidez da máquina-ferramenta, condições de corte e material da ferramenta (LEE et al., 2003; ZIBEROV, 2018). Com o objetivo de avaliar a qualidade superficial em função dos

parâmetros estudados neste trabalho, foram feitas imagens da superfície dos canais e das laterais (entrada e saída da ferramenta) utilizando o MEV.

Após a microusinagem, as amostras foram limpas com acetona em um banho ultrassônico (por 4 min) para remover qualquer sujeira ou fluido de corte, e depois secas com dispositivo soprador de ar. A rugosidade foi medida no fundo dos canais microusinados, com a utilização do Perfilômetro de contato modelo Form Talysurf Intra 50 da marca Taylor Hobson (Fig. 3.18.a). Este possui apalpador de diamante com altura do braço até a ponta do apalpador de 14,7 mm e comprimento do braço de 57,5 mm (Fig. 3.18.b), raio de ponta de 2  $\mu\text{m}$  (Fig. 3.18.c), com resolução de 3 nm (faixa de medição de 0,2 mm) e 16 nm na faixa de medição de 1,0 mm (TAYLOR HOBSON, 2012).

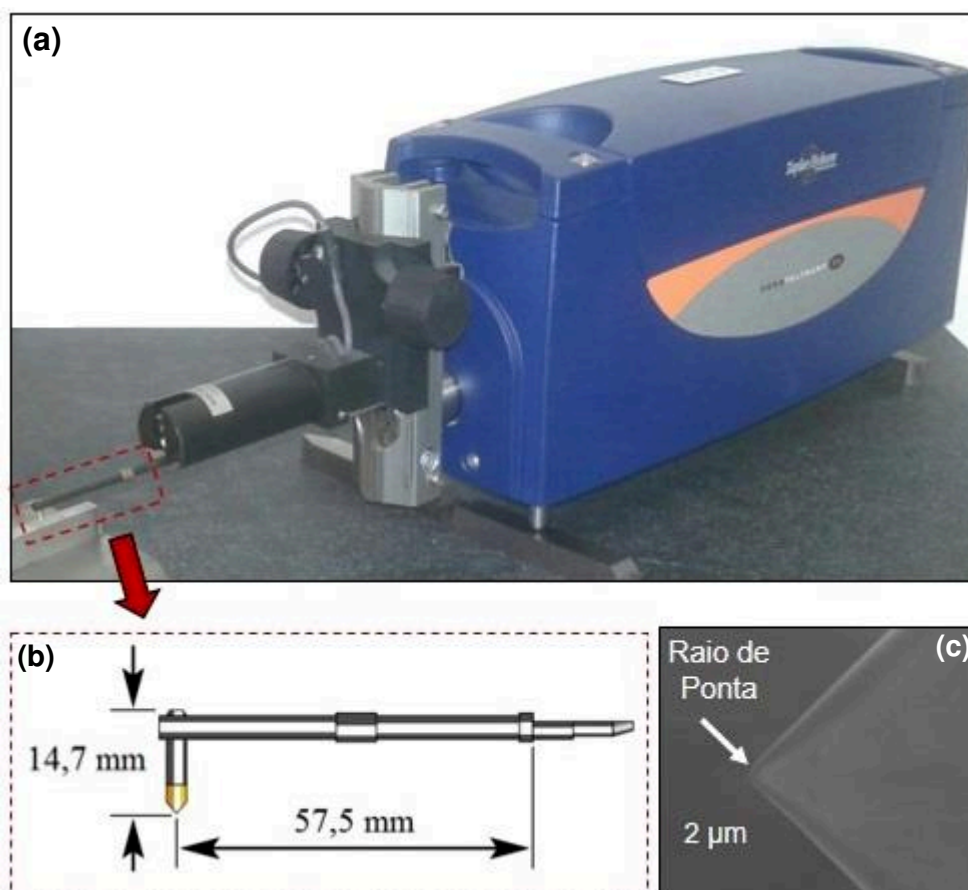


Figura 3.18 - Detalhes do Perfilômetro Form Talysurf Intra 2.

Para medição da rugosidade o apalpador foi posicionado no fundo do canal perpendicularmente às marcas da microfresa deixadas na superfície, na mesma direção do avanço utilizado. Para análise e obtenção do perfil da superfície foi utilizado o *software* Ultra Surface Finish V5, conforme Fig. 3.19. Ressalta-se a complexidade desta medição em função das pequenas dimensões envolvidas, onde é necessária atenção extrema para que



o apalpador percorra sua trajetória de medição apenas no fundo do microcanal, sendo que qualquer desvio pode levar a medições errôneas.

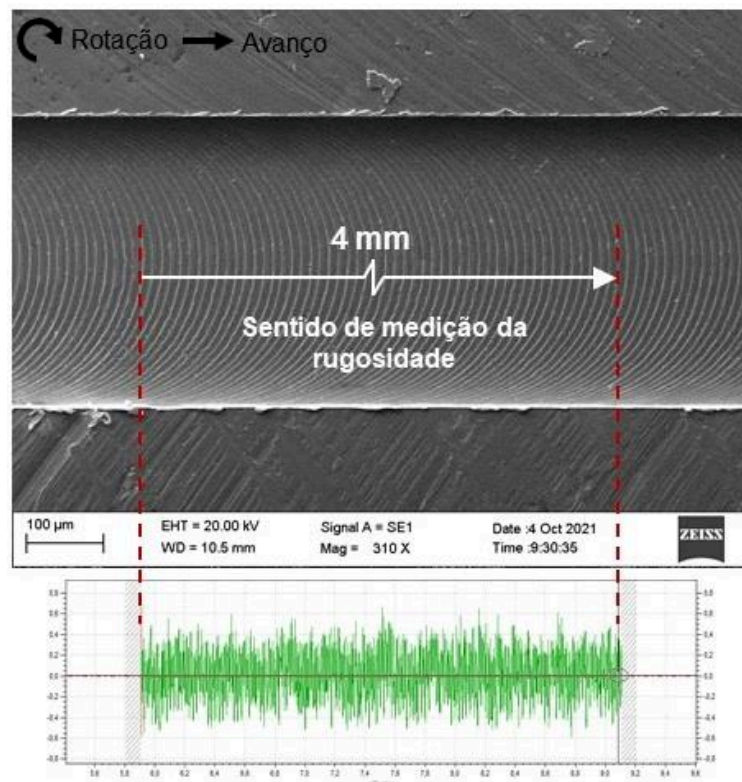


Figura 3.19 - Esquema para avaliação da rugosidade e obtenção do perfil da superfície da peça.

Para obtenção dos valores de rugosidade a temperatura foi controlada em  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ , valor recomendado pela norma ABNT NBR NM ISO 1 (ABNT, 1997). As amostras eram deixadas neste ambiente por no mínimo 12 horas antes da medição, evitando assim desvios devido à dilatação térmica da mesma e dos equipamentos utilizados.

Para análise dos resultados, foram escolhidos os parâmetros  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_{sk}$  e  $R_{ku}$ , a fim de se fazer uma análise exploratória mais completa, visto que os diferentes parâmetros poderiam indicar comportamentos distintos vinculados aos diferentes tipos de amostras e ferramentas. Para tanto, foram realizadas 3 medições em cada canal (início, meio e fim), tomando o devido cuidado para que uma medição não fosse sobreposta a outra.

Para facilitar a análise e visualização dos gráficos, serão apresentados os resultados das médias das vinte e uma medições realizadas (três em cada um dos sete canais), com o respectivo desvio padrão no intervalo de confiança de 95,45 %, agrupados por bloco (S e C) nas condições a seco e com a utilização de MQL.

Destaca-se ainda, que o comprimento de amostragem (cut-off) utilizado foi de 0,8 mm e comprimento de avaliação de 4 mm, recomendado para resultados onde os valores de rugosidade Ra encontram-se acima de 0,1  $\mu\text{m}$  e menores ou iguais a 2  $\mu\text{m}$ , de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008).

### 3.5.3. Formação de rebarba

A avaliação da formação de rebarbas também é um parâmetro muito importante para a microssinagem, visto que normalmente as dimensões são relativamente grandes quando comparadas aos parâmetros envolvidos no corte, como por exemplo o avanço e a profundidade de corte, podendo prejudicar o funcionamento das peças produzidas (ZIBEROV, 2018). No entanto, não se tem um consenso único na literatura, sobre sua análise e principalmente sobre um padrão para medição quantitativa, que seja adequado e inquestionável para microssinagem, sendo utilizadas várias técnicas diferentes (MATHAI e MELKOTE, 2012; ZIBEROV, 2018; DOS SANTOS, 2020; CHEN, WANG e ZHANG, 2020; KUMAR, DEB e PAUL, 2021).

Neste trabalho, para análise das rebarbas (de forma geral), foram obtidas várias imagens das superfícies e das laterais das amostras com a utilização do MEV, de acordo com a necessidade percebida, a fim de promover uma análise exploratória de todos os detalhes identificados. Em relação aos resultados, primeiramente as rebarbas serão avaliadas de forma qualitativa, tomando como base a classificação típica de tipo e posição realizada por Lee e Dornfeld (2002) e posteriormente, de forma semelhante, por Kiswanto, Zariatin e Ko (2014). As rebarbas de topo serão classificadas ainda, de acordo com os tipos e formas propostos por Chern et al. (2007) e analisados também o volume, ocorrência e fatores que interferiram em sua formação.

Para análise quantitativa das rebarbas de topo concordante e discordante (que foram predominantes neste trabalho), foram selecionadas como base três imagens de cada um dos canais (início, meio e fim) e utilizada uma metodologia baseada na proposta de Chen, Wang e Zhang (2020), porém com algumas adaptações. Primeiramente, as sete imagens de cada uma das posições foram analisadas de forma qualitativa e foram escolhidas para a medição as três maiores rebarbas de topo, sendo uma do início, uma do meio e uma do fim das superfícies usinadas (independente do canal). Para cada medição foram traçadas duas linhas de referência, uma posicionada em cima do início do topo do canal e outra sobre a ponta da maior rebarba identificada, sendo medido o comprimento perpendicular entre as linhas de referência, conforme demonstrado na Fig. 3.20 (a) onde foi medido o comprimento da rebarba do lado discordante do canal. Na Fig. 3.20 (b) é mostrado o canal usinado, com



as devidas ampliações e em Fig. 3.20 (c) o mesmo processo de medição de rebarba, porém do lado concordante.

Os resultados serão apresentados em gráficos, com a média destas três medições e os respectivos desvios padrões, no intervalo de confiança de 95,45 %, para cada uma das condições testadas, tanto do lado concordante, quanto do lado discordante. Serão apresentados também, valores de médias negativas (lado concordante e discordante), referentes a um tipo diferente de rebarba que se formou de forma inversa às tradicionais (posicionadas para dentro do canal), que serão detalhadas e explicadas na sessão 4.3 deste trabalho.

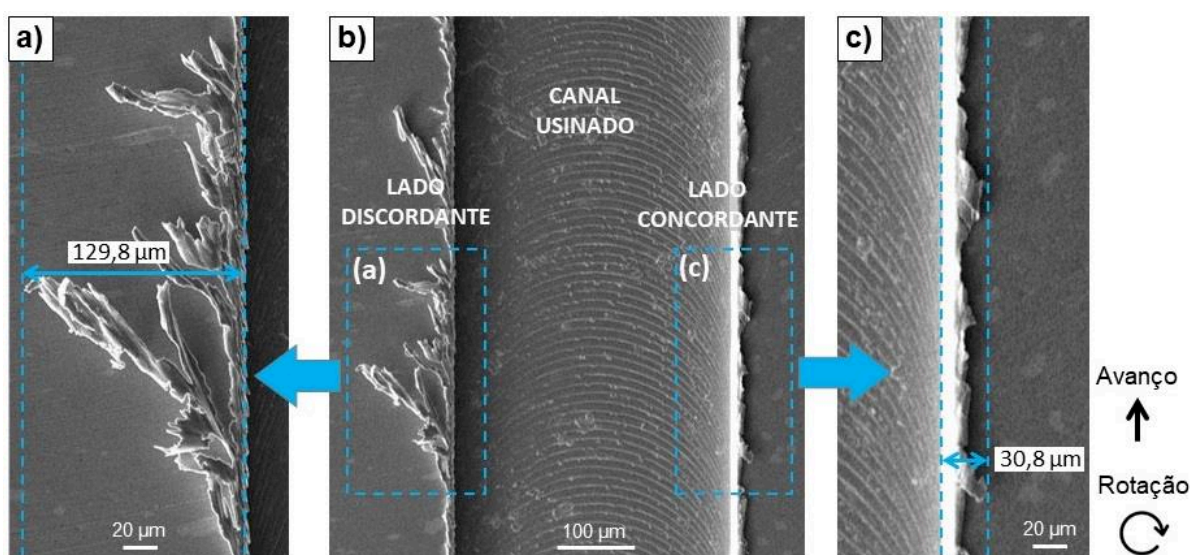


Figura 3.20 - Medição do comprimento da rebarba de topo, em (a) lado discordante, (b) imagem do canal microusinado e (c) lado concordante.

Ressalta-se que a análise quantitativa realizada é um parâmetro que indica apenas uma comparação entre o tamanho/comprimento das maiores rebarbas de topo formadas em cada um dos ensaios, não refletindo o volume de rebarbas, posição ou analogia em relação ao desgaste da ferramenta comparado ao comprimento usinado, sendo estas análises realizadas apenas de forma visual e qualitativa (através das imagens obtidas via MEV). Destaca-se também que, apesar da utilização do termo “comprimento da rebarba” os valores apresentados nem sempre refletirão exatamente o comprimento da mesma, visto que dependendo do tipo de rebarba, poderá em alguns casos estar inclinada, como demonstrado na Fig. 3.21 onde em (a) é apresentado o comprimento que foi medido e apresentado nos resultados (de acordo com a metodologia descrita) e em (b) o comprimento real da rebarba (da origem até a ponta).

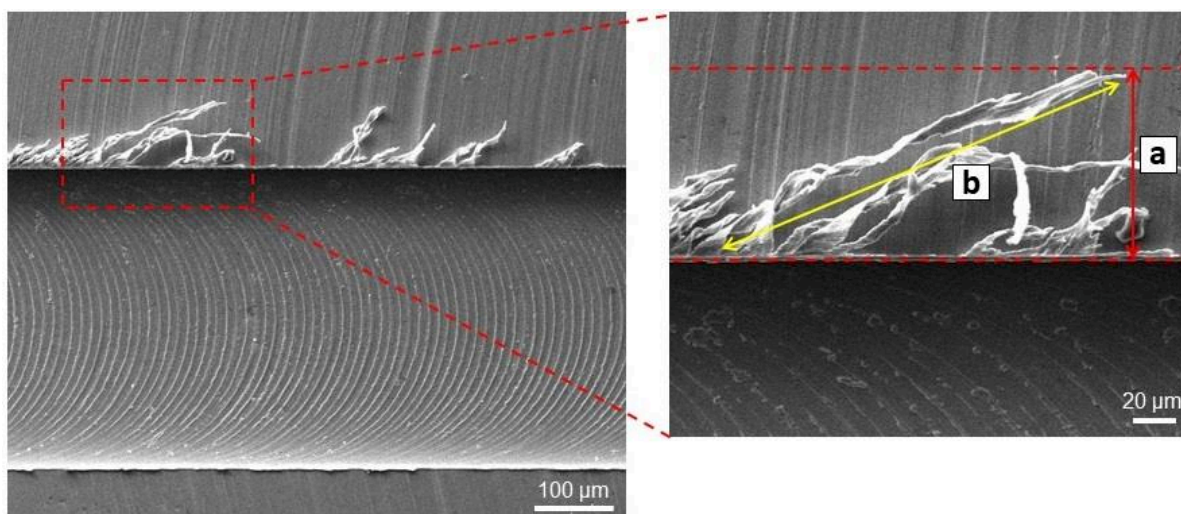


Figura 3.21 - Detalhes da medição do comprimento da rebarba de topo, em (a) o comprimento real da rebarba e em (b) comprimento medido de acordo com a metodologia.

#### 3.5.4. Formação de Cavaco

Amostras dos cavacos formados durante os ensaios foram coletadas e analisadas. Para coleta dos cavacos foi utilizada fita de carbono, encostando-a levemente (para evitar esmagamento do cavaco) ao lado do canal gerado, logo após a sua usinagem, para garantir que seriam coletados apenas cavacos relativos a aquele ensaio. Assim, os cavacos presentes nesta região ficavam aderidos à fita de carbono e essa posteriormente era levada ao MEV, para que imagens dos mesmos fossem feitas.

Ressalta-se a dificuldade de coleta devido às pequenas dimensões, praticamente invisíveis a olho nu e a impossibilidade de manipulação dos mesmos, sendo, portanto, um procedimento literalmente “às cegas” onde não se sabe ao certo a qualidade das amostras coletadas e sua análise é totalmente dependente de equipamentos de microscopia. Devido às limitações dos microscópios disponíveis, serão analisadas e apresentadas somente imagens 2D da vista superior da fita de carbono contendo os cavacos coletados.

As dimensões apresentadas como resultado: espessura das lamelas, comprimento, largura e espessura os cavacos, foram medidas através do *software ImageJ*, utilizando como base a própria escala da imagem, gerada pelo MEV. As medições foram repetidas de acordo com as amostras disponíveis e a necessidade, calculados os respectivos desvios padrões, que serão apresentados no intervalo de confiança de 95,45 %

Destaca-se também, que serão apresentados e analisados apenas cavacos provenientes dos ensaios onde não houve a utilização de fluido de corte, visto que o método de coleta mencionado é praticamente inviável quando utilizado MQL, sendo um grande

desafio a limpeza dos cavacos (amostra) da maneira tradicional por ultrassom e o fluido presente na fita de carbono pode condensar-se, danificando a lente do MEV.

### 3.6. Fluxograma das atividades desenvolvidas

Para melhor compreensão de todo o trabalho realizado, as atividades desenvolvidas para elaboração da tese são expostas no fluxograma da Fig. 3.22 e os respectivos resultados descritos detalhadamente no Capítulo IV.

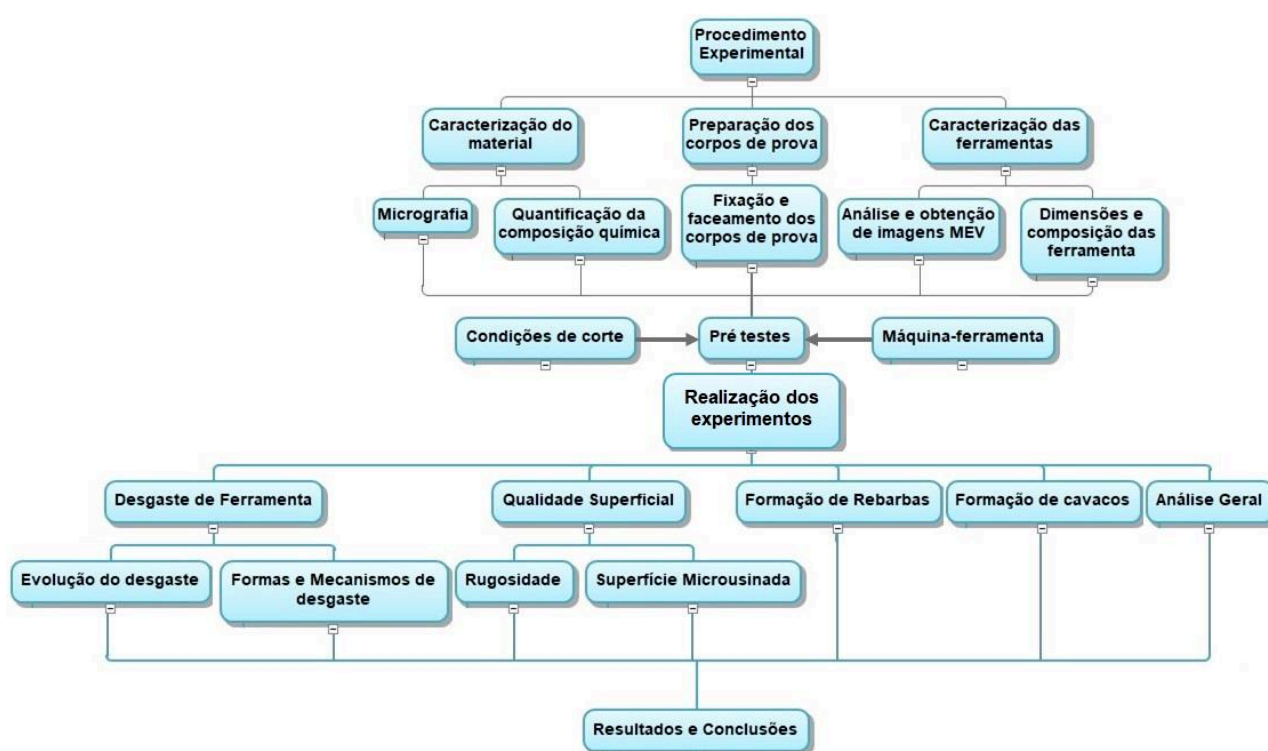


Figura 3.22 - Fluxograma das atividades desenvolvidas.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram microusinadas duas amostras diferentes (S e C) de aço inoxidável 316L, impressas aditivamente por Fusão Seletiva a Laser (SLM). Foram utilizadas 20 microfresas com diâmetro de 396  $\mu\text{m}$  (4 sem revestimento, 4 com revestimento TiN, 4 com revestimento AlCrN, 4 com revestimento TiAl e 4 com revestimento DLC), condições de corte: a seco e com MQL. Foram produzidos 140 canais (70 a seco e 70 utilizando a técnica MQL) totalizando um comprimento usinado de 1,4 m. Os resultados desta pesquisa serão apresentados na seguinte sequência: desgaste das ferramentas (evolução, formas e mecanismos), qualidade superficial (rugosidade e superfície microusinada), formação de rebarbas, formação de cavacos e análise geral.

### 4.1. Desgaste de Ferramenta

No microfresamento o desgaste da ferramenta está profundamente relacionado aos parâmetros geométricos e materiais utilizados para confecção das mesmas, aos materiais da peça, ao fluido utilizado para resfriamento, entre outros (CHEN et al., 2020). Este desgaste poderá resultar ainda, em mudanças nas dimensões da peça usinada, aumento da força de corte e uma inevitável e constante troca de microferramentas em função de sua degeneração, conseqüente da perda das tolerâncias geométricas (ZIBEROV, 2018).

Neste item serão expostos e discutidos os resultados obtidos no que se refere a evolução, formas e mecanismos de desgaste das ferramentas utilizadas.

#### 4.1.1. *Evolução do desgaste*

No gráfico da Fig. 4.1 pode-se observar a evolução do desgaste para todas as ferramentas utilizadas na usinagem do Bloco S na condição a seco. Logo após a usinagem do primeiro canal (10 mm) verificou-se um desgaste acentuado para todas as ferramentas, variando entre aproximadamente 0,9 % do diâmetro inicial da ferramenta com revestimento TiAl (que apresentou o menor desgaste) a 2,7 % do diâmetro inicial da ferramenta com revestimento AlCrN (maior desgaste). Essa maior taxa de desgaste inicial é considerada

uma característica típica de desgaste das ferramentas na usinagem macro, onde, em função da adequação da ferramenta ao sistema tribológico, esta perde a afiação, conseqüentemente ocorrendo o arredondando do raio de aresta (ZUM GAHR, 1987). No entanto essa mesma condição é comumente observada em vários estudos de microusinagem, envolvendo diferentes ferramentas, condições de corte e materiais usinados e portanto pode ser considerada aplicável também aos resultados obtidos neste trabalho.

Logo após o primeiro canal são observadas taxas de desgaste menores e constantes para todas as ferramentas, exceto pela ferramenta sem revestimento. Com 30 mm usinados, esta apresentou uma taxa de desgaste 176 % maior que a obtida após a usinagem do primeiro canal, chegando a uma diminuição de aproximadamente 7,7 % do seu diâmetro, após a usinagem de 70 mm. As outras ferramentas apresentaram taxa de desgaste variando de aproximadamente 1,6 % do diâmetro, ferramenta com revestimento TiAlN (menor desgaste) a 3,3 % do diâmetro, ferramenta com revestimento AlCrN (segundo maior desgaste, após a ferramenta sem revestimento).

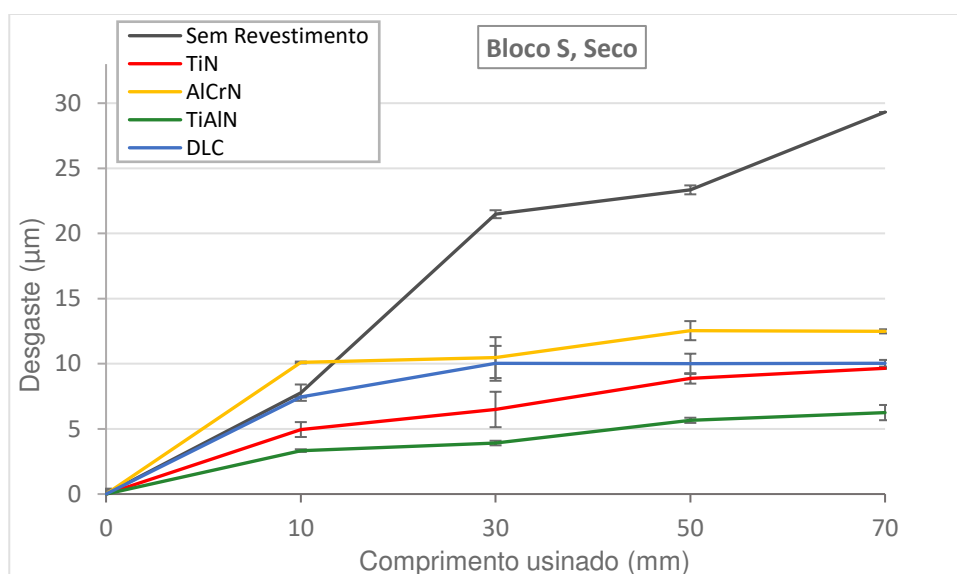


Figura 4.1 - Evolução do desgaste das ferramentas na usinagem do Bloco S, na condição a seco.

A Figura 4.2 contém algumas imagens de topo utilizadas para a medição e acompanhamento do desgaste, sendo apresentadas as ferramentas novas, após o primeiro canal (10 mm) e após sétimo canal (70 mm) usinados, bem como os seus respectivos desgastes médios e desvio padrão. As imagens dos diferentes tipos de ferramentas foram organizadas em uma sequência crescente em função do desgaste final medido. Através destas é possível observar que quase todas as ferramentas se desgastam de forma

parecida, onde ocorre primeiramente a perda parcial da afiação, logo em seguida um desgaste mais lento, porém sempre progressivo, com conseqüente arredondamento do raio de aresta.

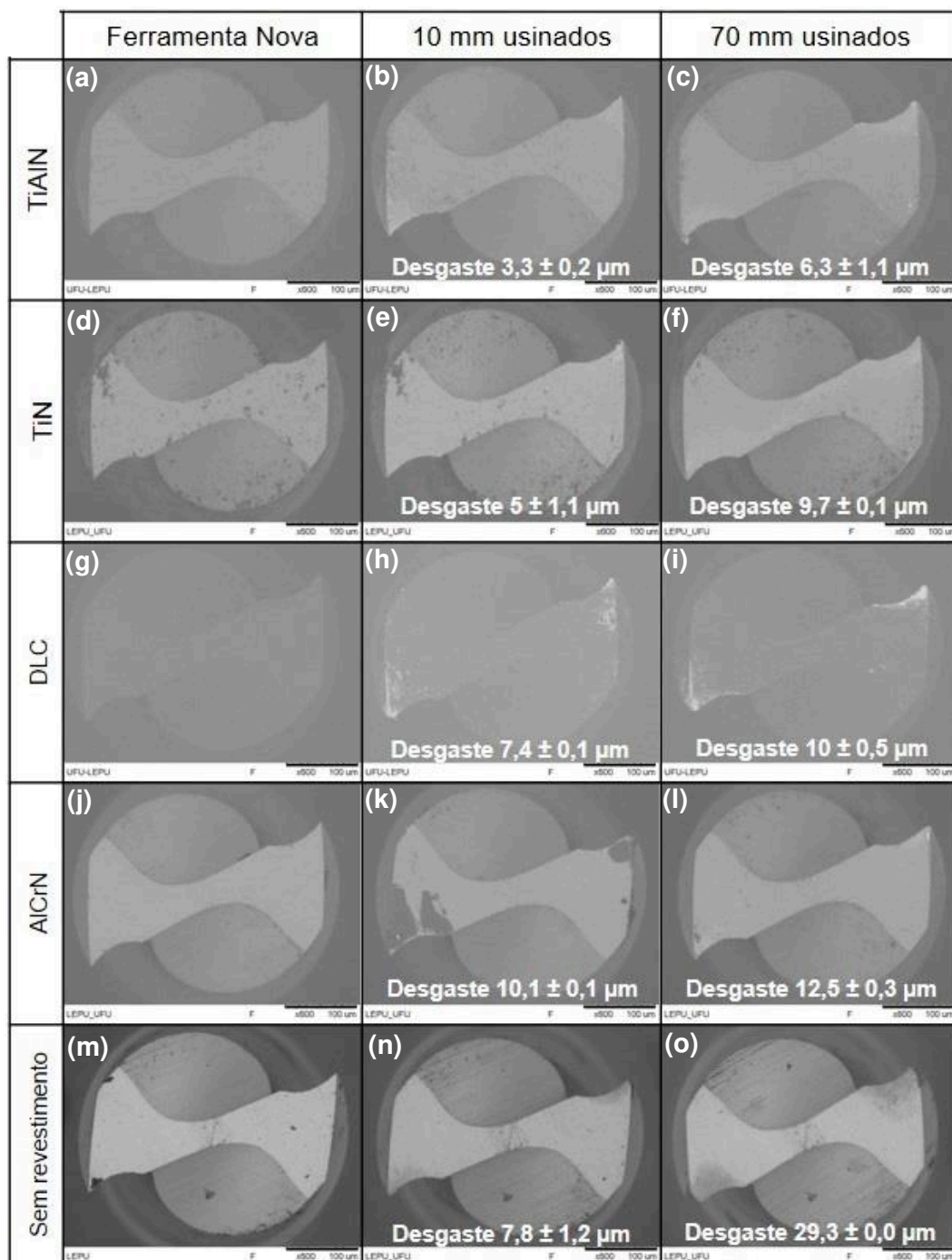


Figura 4.2 - Imagens de topo das ferramentas novas, após 10 mm e após 70 mm usinados, Bloco S, na condição a seco.



Ainda na Figura 4.2, a ferramenta com revestimento DLC, apesar de se enquadrar neste comportamento padrão de desgaste, ao observar a imagem final (Fig. 4.2.i) nota-se que nas extremidades da aresta de corte da ferramenta o revestimento se desgastou, expondo o substrato da ferramenta. Já a ferramenta sem revestimento tem seu desgaste acentuado em função de lascamentos na superfície principal de folga, que será apresentado em detalhes na seção 4.1.2 deste trabalho. Ressalta-se o fato de que este tipo de desgaste é considerado comum em processos de corte interrompido, como o fresamento, no entanto, foi identificado apenas nas ferramentas sem revestimento.

Foram realizados ensaios também na amostra Bloco C, utilizando as mesmas ferramentas, parâmetros e condições de corte. Os resultados da evolução do desgaste apresentados na Fig. 4.3, demonstram que em geral quase todas as ferramentas (exceto a ferramenta com revestimento DLC) apresentaram morfologia de desgastes muito semelhantes aos obtidos e já comentados, na usinagem do Bloco S. De modo semelhante, todas as ferramentas apresentaram uma maior taxa de desgaste após a usinagem do primeiro canal, com destaque para a ferramenta sem revestimento que desgastou cerca de 3 % do seu diâmetro, sendo este 50 % maior que o desgaste inicial no Bloco S, porém manteve o padrão da continuação da alta taxa de desgaste na usinagem do segundo e terceiro canais. Fazendo uma analogia em relação ao gráfico de comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte, proposto por Zum Gahr (1987) pode-se afirmar que a ferramenta sem revestimento necessitou de um tempo maior de corte (quando comparado as outras ferramentas) para se adequar ao sistema tribológico, equivalente ao estágio I de desgaste. Uma redução considerável da taxa de desgaste foi percebida apenas depois da usinagem de 30 mm, podendo indicar que a ferramenta tenha entrado no estágio II de desgaste, onde são medidas baixas taxas de desgaste ao longo do comprimento usinado, até que esta passe para o estágio III, onde o acelerado desgaste leva a mesma a quebra. Após a usinagem de 70 mm a ferramenta sem revestimento apresentou um desgaste final de aproximadamente 6,0 % do seu diâmetro, sendo este 1,4 % abaixo do desgaste final da ferramenta sem revestimento na usinagem do Bloco S a seco.

Ainda na Fig. 4.3 é possível observar que a evolução do desgaste da ferramenta com revestimento DLC, foi completamente diferente e 82 % superior ao desgaste observado na usinagem do Bloco S, sendo o desgaste final médio de aproximadamente 4,8 % do seu diâmetro. O menor desgaste final de  $\cong 1,8$  % do diâmetro, foi observado na ferramenta com revestimento TiN, seguido por TiAlN ( $\cong 2,2$  %) e AlCrN ( $\cong 2,4$  %), sendo apenas o desgaste da ferramenta TiAlN, superior aos encontrados na usinagem do Bloco S.

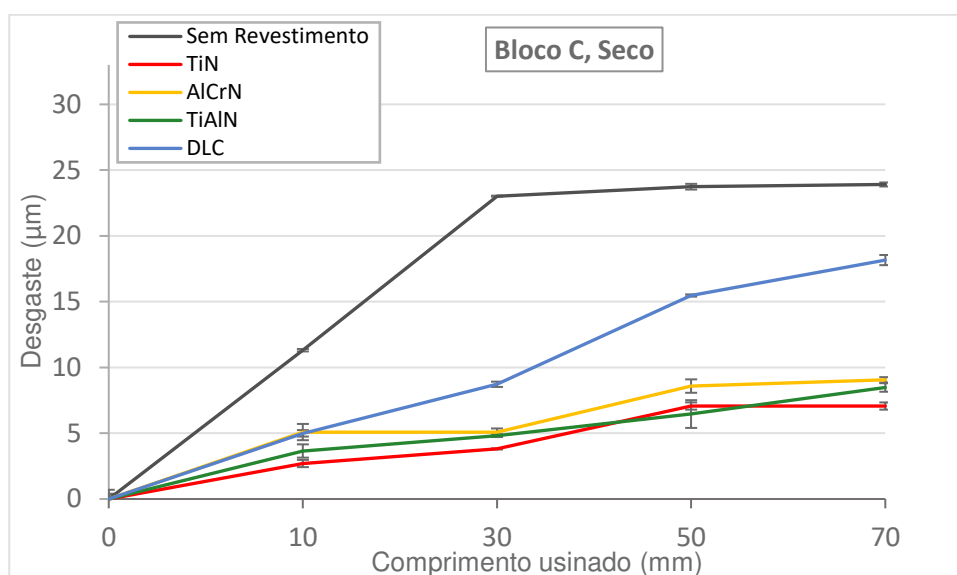


Figura 4.3 - Evolução do desgaste das ferramentas na usinagem do Bloco C, na condição a seco.

Ao observar as imagens de topo das ferramentas utilizadas na usinagem do Bloco C, seco (Fig. 4.4), comparando-as com as ferramentas utilizadas no Bloco S, pode-se concluir que as ferramentas com revestimento TiN, TiAlN e AlCrN tiveram desempenho bastante semelhante. Na imagem da ferramenta com revestimento DLC é possível observar que esta se desgastou da mesma forma, com perda de revestimento e consequente exposição do substrato na ponta das arestas de corte (Fig. 4.4.i), no entanto é perceptível o maior desgaste medido. Na ferramenta sem revestimento também foi observado lascamentos na superfície principal de folga (Fig. 4.4.o), porém menores que os obtidos ao usinar o Bloco S.



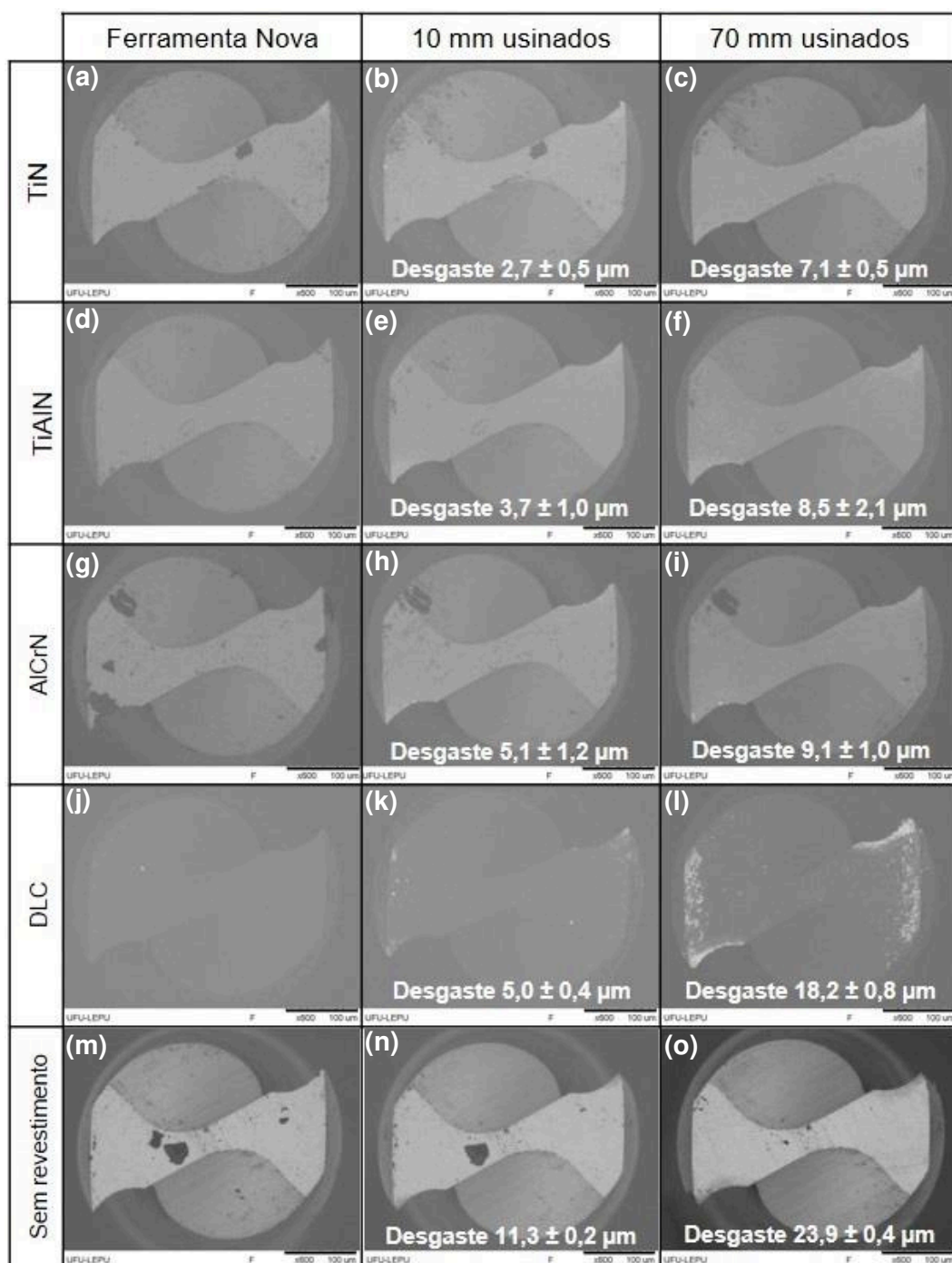


Figura 4.4 - Imagens de topo das ferramentas novas, após 10 mm e após 70 mm usinados, Bloco C, na condição a seco.

Gomes et al. (2021) também usinaram aço inoxidável 316L, obtido através de processo convencional. Os autores utilizaram ferramentas de metal duro, 400  $\mu\text{m}$  de diâmetro, revestidas com TiAlN, na condição a seco, porém com maiores rotações e maiores valores de velocidade de corte, o desgaste foi medido através da imagem de topo nas duas arestas de corte. No que se refere a evolução das etapas de desgaste das microferramentas,

foram encontrados resultados semelhantes, onde a taxa de desgaste inicial foi elevada (medida após a usinagem do primeiro canal) e logo após diminuiu ao longo dos outros canais. Em todos os ensaios, as taxas de desgaste encontradas após a usinagem do primeiro canal e com comprimento usinado de 74,04 mm (semelhante ao total usinado neste trabalho) foram superiores aquelas encontradas neste estudo, o que é considerado um resultado esperado visto que a maior velocidade de corte e rotação produzem um aumento da temperatura na região do corte, favorecendo teoricamente, um maior desgaste das ferramentas.

Ao comparar diretamente o desempenho das ferramentas com o mesmo revestimento (TiAlN), somados os desgastes das arestas, o desgaste total foi 26  $\mu\text{m}$ , em média aproximadamente 259 % superior aos desgastes finais medidos, corte a seco, Bloco S e Bloco C. Ressalta-se o fato de que as condições de corte utilizadas foram bem mais agressivas, no entanto, devido à alta diferença, pode-se inferir que possivelmente as microestruturas obtidas no aço inoxidável 316L SLM (independente da estratégia de varredura) quando comparado ao aço inoxidável 316L convencional, tenham favorecido o corte e conseqüentemente o menor desgaste da ferramenta.

É importante destacar que o microfresamento de metais ou ligas, produzidos por SLM (ou outras técnicas de manufatura aditiva), assim como a comparação com a microusinagem destes mesmos materiais obtidos de maneira convencional, foram muito pouco estudados. Ji et al. (2021) encontraram um resultado semelhante a este, mas na comparação da microusinagem de IN718 (SLM) com IN718 (convencional). Os autores utilizaram ferramentas de metal duro, revestidas com NAlTi, 300  $\mu\text{m}$  de diâmetro, rotação de 25 000 rpm a 30 000 rpm, avanço de 5 e 10 mm / min e profundidade de corte 200  $\mu\text{m}$ . Os autores mediram o desgaste de flanco e a redução do diâmetro da ferramenta, sendo que, para todos os parâmetros de corte testados as ferramentas se desgastaram mais ao usar IN718 (convencional).

No gráfico da Fig. 4.5 é possível observar a evolução do desgaste para todas as ferramentas utilizadas na usinagem do Bloco S, com aplicação de fluido pela técnica MQL. Quando comparada à usinagem do Bloco S na condição a seco, não são percebidas variações significativas (melhora ou piora) do desgaste. A ferramenta sem revestimento apresenta o maior desgaste inicial após 10 mm usinados, aproximadamente 4,9 % do seu diâmetro, sendo 134 % superior ao desgaste inicial medido na usinagem do Bloco S (seco) e 62 % superior ao Bloco C (seco). No entanto, o resultado após 70 mm usinados é praticamente igual (considerando o desvio padrão) ao obtido na usinagem do Bloco C (seco). As ferramentas com outros revestimentos, apresentaram resultados em média semelhantes ou com pouca variação, sendo o menor desgaste final aproximadamente 1,35 % do diâmetro

da ferramenta com revestimento TiAlN e o maior (exceto ferramenta sem revestimento) de 2,9 % do diâmetro da ferramenta com revestimento DLC.

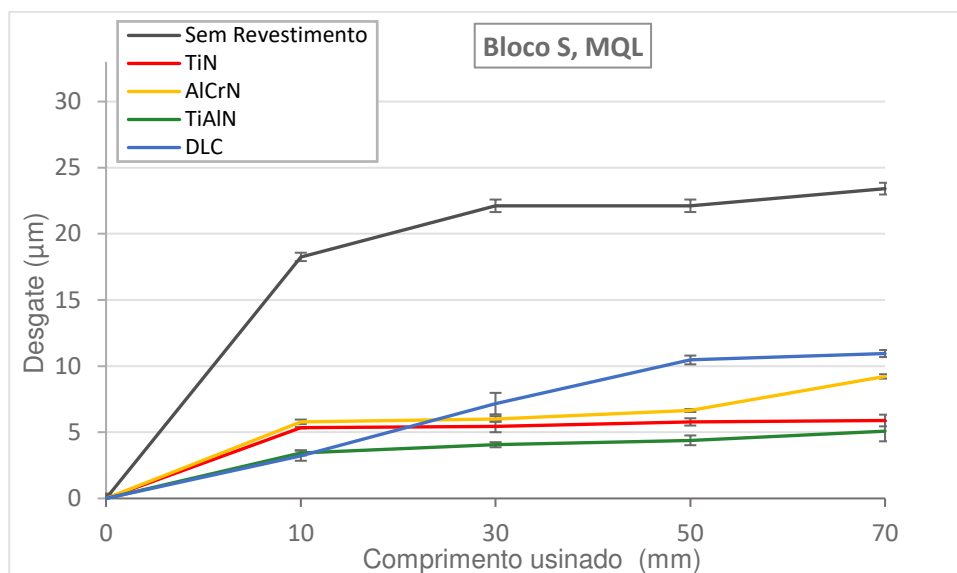


Figura 4.5 - Evolução do desgaste das ferramentas na usinagem do Bloco S, com MQL.

A Figura 4.6 contém as imagens de topo utilizadas para a medição e acompanhamento do desgaste, na usinagem do Bloco S, com MQL. Ao analisar qualitativamente e visualmente, todas as condições e padrão de desgaste são muito semelhantes, quando comparadas às ferramentas equivalentes (mencionadas anteriormente), tanto na usinagem do mesmo material (Bloco S) na condição a seco, quanto no Bloco C, seco.

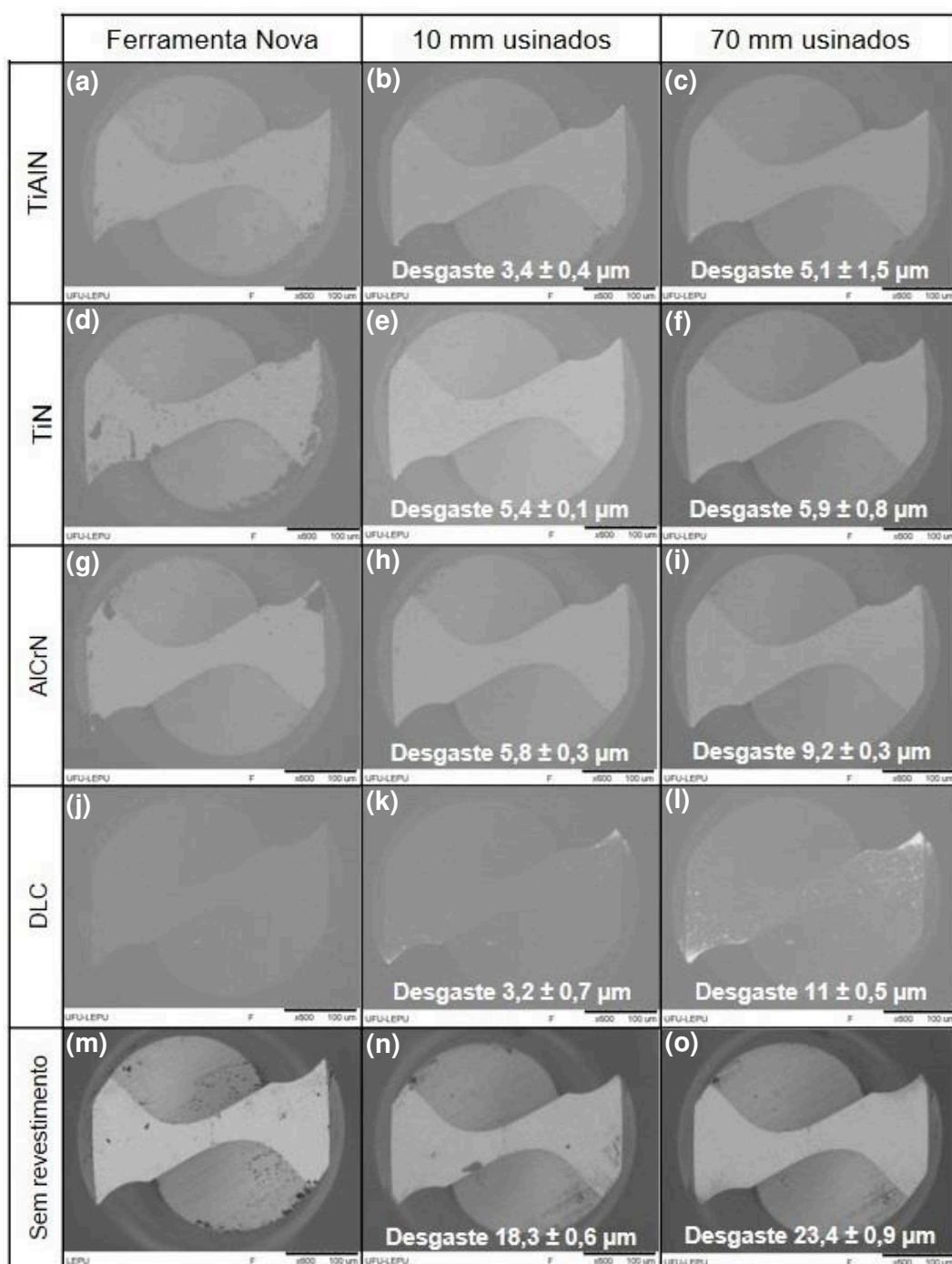


Figura 4.6 Imagens de topo das ferramentas novas, após 10 mm e após 70 mm usinados, Bloco S, utilizando MQL.

Por meio da Figura 4.7 é possível observar as imagens de desgastes obtidos na usinagem do Bloco C com MQL. Percebe-se que neste caso, a utilização de MQL reduziu aproximadamente 21 % o desgaste final da ferramenta sem revestimento, (quando comparada a usinagem a seco) e em média aproximadamente 28 % em relação aos desgastes finais obtidos no Bloco S (seco e MQL). A técnica MQL também auxiliou na

redução em aproximadamente 41 % o desgaste final da ferramenta com revestimento DLC (quando comparada a usinagem a seco). As ferramentas com revestimentos AlCrN, TiAlN e TiN, apesar de uma evolução do desgaste diferente com o incremento do comprimento usinado (quando comparada aos parâmetros anteriores), ao final obtiveram resultado bastante semelhante aos já encontrados sendo o menor desgaste de 1,9 % do diâmetro da ferramenta AlCrN, seguido por 2,4 % ferramenta TiAlN e 2,5 % ferramenta TiN.

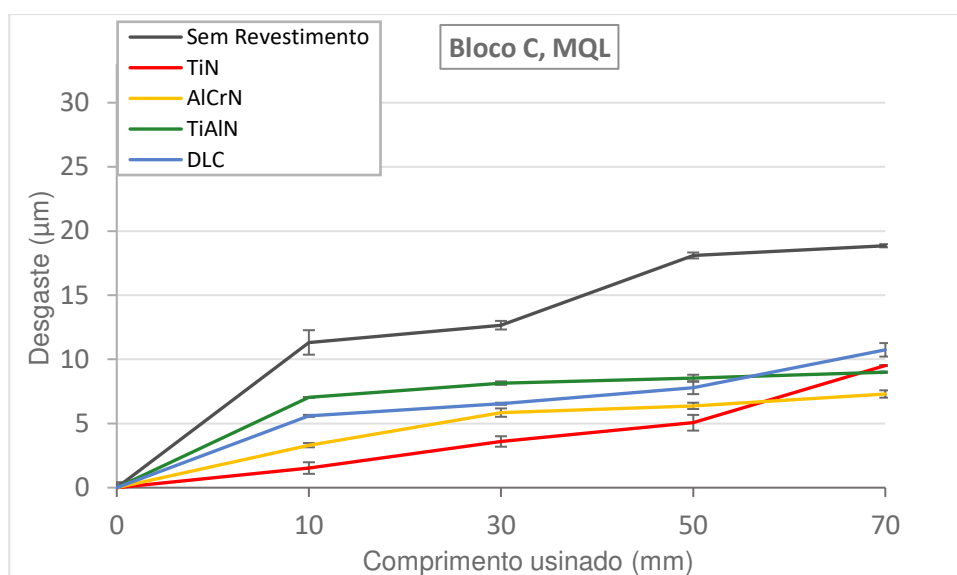


Figura 4.7 - Evolução do desgaste das ferramentas na usinagem do Bloco C, com MQL.

A Figura 4.8 apresenta as imagens de topo utilizadas para a medição, com seus respectivos desgastes, detalhados em função do comprimento usinado de 10 mm e 70 mm, Bloco C, com MQL. Apesar das diferenças já mencionadas, apenas as mais relevantes (Fig.4.8.o e Fig.4.8.l respectivamente: diminuição do desgaste da ferramenta sem revestimento e com revestimento DLC) podem ser percebidas de maneira muito sutil através das imagens.

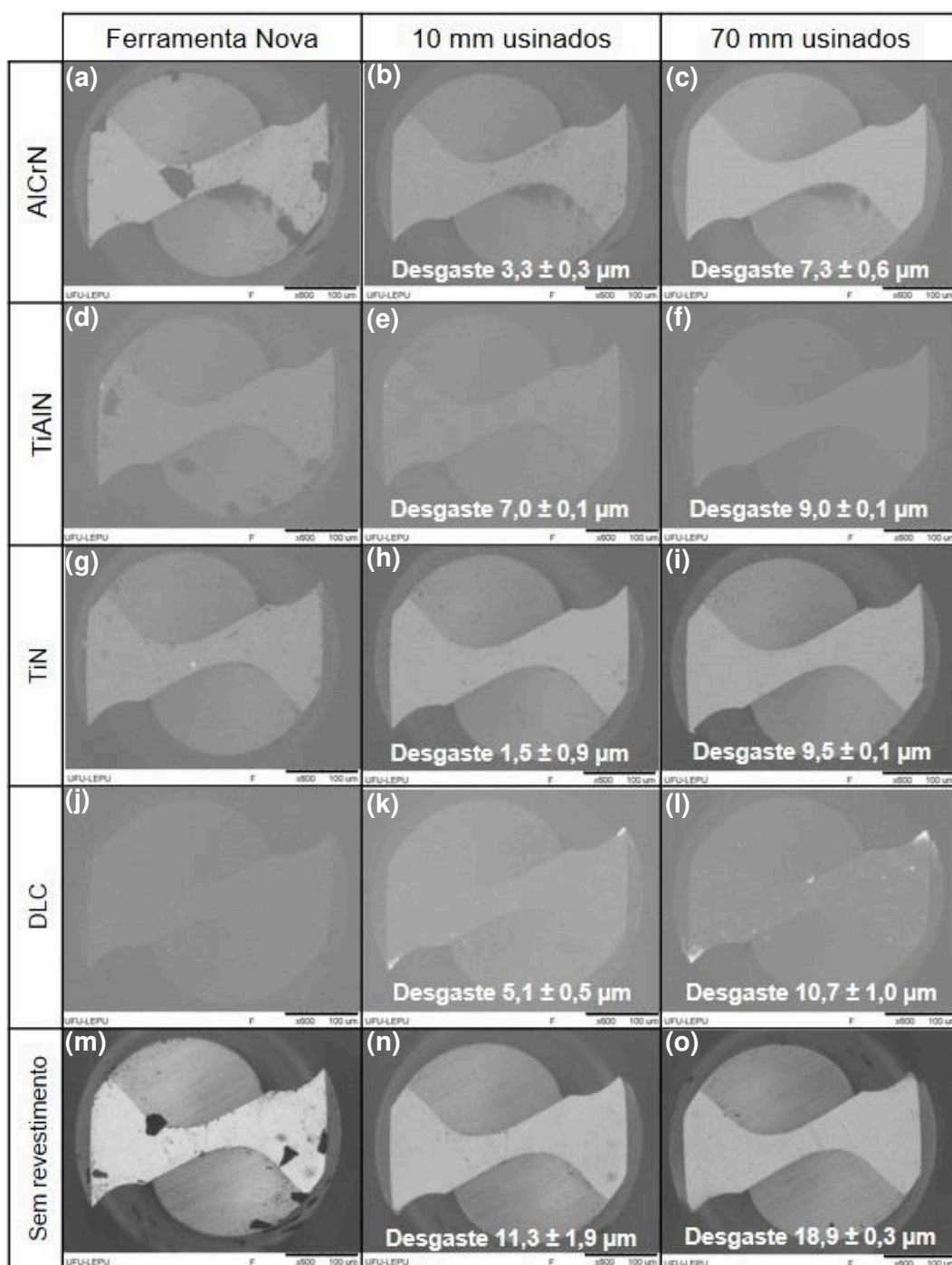


Figura 4.8 - Imagens de topo das ferramentas novas, após 10 mm e após 70 mm usinados, Bloco C, utilizando MQL.

Comparando os desempenhos, em relação ao desgaste, das condições de usinagem a seco diretamente com a usinagem utilizando MQL, esperava-se quando utilizado MQL (em todas as condições e ambas as amostras) uma melhoria significativa, visto que teoricamente sua utilização diminuiria o atrito na região de corte. Ou ainda, que a utilização do fluido de corte aumentasse a estabilidade dinâmica, reduzindo as vibrações de acordo com o proposto

por Mittal, et al. (2017). No entanto, ao compararmos os resultados encontrados na usinagem do bloco S (das ferramentas com revestimento) percebemos que houve uma ligeira melhora do desgaste, quando utilizado MQL, para as ferramentas TiN, AlCrN, TiAlN, porém a ferramenta DLC apresentou desgaste mais elevado após usar os últimos canais. Já na usinagem do bloco C, na grande maioria das medições realizadas ao longo do comprimento usinado, o desgaste foi maior (ligeiramente), ao utilizar a técnica MQL. No entanto, apenas as ferramentas TiN e TiAlN (de forma mínima) apresentaram maior desgaste final (após a usinagem de 70 mm). Em todas as outras ferramentas foram observados menores valores de desgastes, em maior ou menor proporção.

Ziberov (2018) comparou o desgaste na usinagem a seco e MQL de Ti-6Al-4V, utilizando ferramentas sem revestimento, TiAlN e DLC. Em todas as condições testadas, as ferramentas utilizadas no corte a seco, o autor constatou menor desgaste prolongando a vida da ferramenta em até 7 vezes (DLC, o que ele atribuiu à intensificação da variação cíclica de temperatura na ferramenta, induzida pela utilização de MQL, o que colaborou para o maior desgaste das ferramentas.

Khan, et al. (2018) testaram duas diferentes pressões e dois diferentes bicos (áspero e liso) para aplicação de fluido de corte por MQL, na microusinagem de Inconel 718 SLM e concluíram que a maior pressão, combinada a ambos os bicos, produziam menores gotas de fluido que em função da pressão voam em alta velocidade e conseguem lubrificar efetivamente a ferramenta, reduzindo a temperatura, conseqüentemente gerando menor desgaste na ferramenta. No entanto, ao utilizarem a menor pressão (40 psi), um pouco mais alta que a utilizada neste trabalho (33 psi), formaram-se gotas maiores, de baixa densidade, que não conseguiram fornecer lubrificação adequada para a ferramenta e a peça de trabalho, levando a um desgaste inesperado das ferramentas.

Neste trabalho, para os casos onde houve um maior desgaste com a utilização da técnica MQL, admite-se que possa ter ocorrido tanto a intensificação da variação cíclica da temperatura, quanto a lubrificação inadequada em função da pressão utilizada. Contudo, seria necessário a continuação do estudo para identificar se o resultado foi apenas pontual ou se de fato é uma tendência, para a combinação bloco-revestimento, visto que na microusinagem qualquer alteração na dinâmica de corte é suficiente para alterar as forças de corte, conseqüentemente influenciar no maior ou menor desgaste. Atualmente no laboratório está sendo utilizada pressão de 6 bar (87 psi) para aplicação de fluido de corte no microfresamento.

#### 4.1.2. *Formas e Mecanismos de Desgaste da Ferramenta*

Para identificação das formas e mecanismos de desgaste, foram analisadas todas as imagens das superfícies principal e secundária de folga e da superfície de saída das ferramentas, realizadas conforme descrito anteriormente. Uma das formas predominantes de desgaste observado nas microfresas foi o desgaste de ponta, que ocorre de forma acentuada já no primeiro passe, com o consequente arredondamento do raio de ponta. Ao longo do comprimento usinado essa taxa de desgaste diminui, porém se mantém crescente em função do contato entre a microferramenta e a peça, aumentando o desgaste progressivamente.

Na Figura 4.9 (a) é possível observar a medição do raio de ponta em uma ferramenta nova sem revestimento, 2,1  $\mu\text{m}$ , comparada as medições realizadas em algumas ferramentas após o comprimento usinado de 70 mm. A Figura 4.9 (b) destaca o raio de ponta de 6,5  $\mu\text{m}$ , medido em uma ferramenta com revestimento TiN utilizada para usinar o bloco C com MQL, aproximadamente 209 % maior que na ferramenta nova, Fig. 4.9 (c) raio de ponta de 7,6  $\mu\text{m}$ , medido em uma ferramenta com revestimento TiNAl utilizada para usinar o bloco S na condição a seco, aproximadamente 262 % maior que o raio medido na ferramenta nova, e por fim, Fig. 4.9 (d) raio de ponta de 8,1  $\mu\text{m}$ , medido em uma ferramenta com revestimento AlCrN utilizada para usinar o bloco S com MQL, aproximadamente 286 % maior que na ferramenta nova. Ressalta-se o fato de que todas as ferramentas utilizadas, em ambos os blocos e condições (seco e MQL) apresentaram em maior ou menor grau o desgaste e arredondamento da ponta. Não foi observada nenhuma tendência clara de aumento ou diminuição, possível de ser vinculada diretamente a algum parâmetro de entrada.



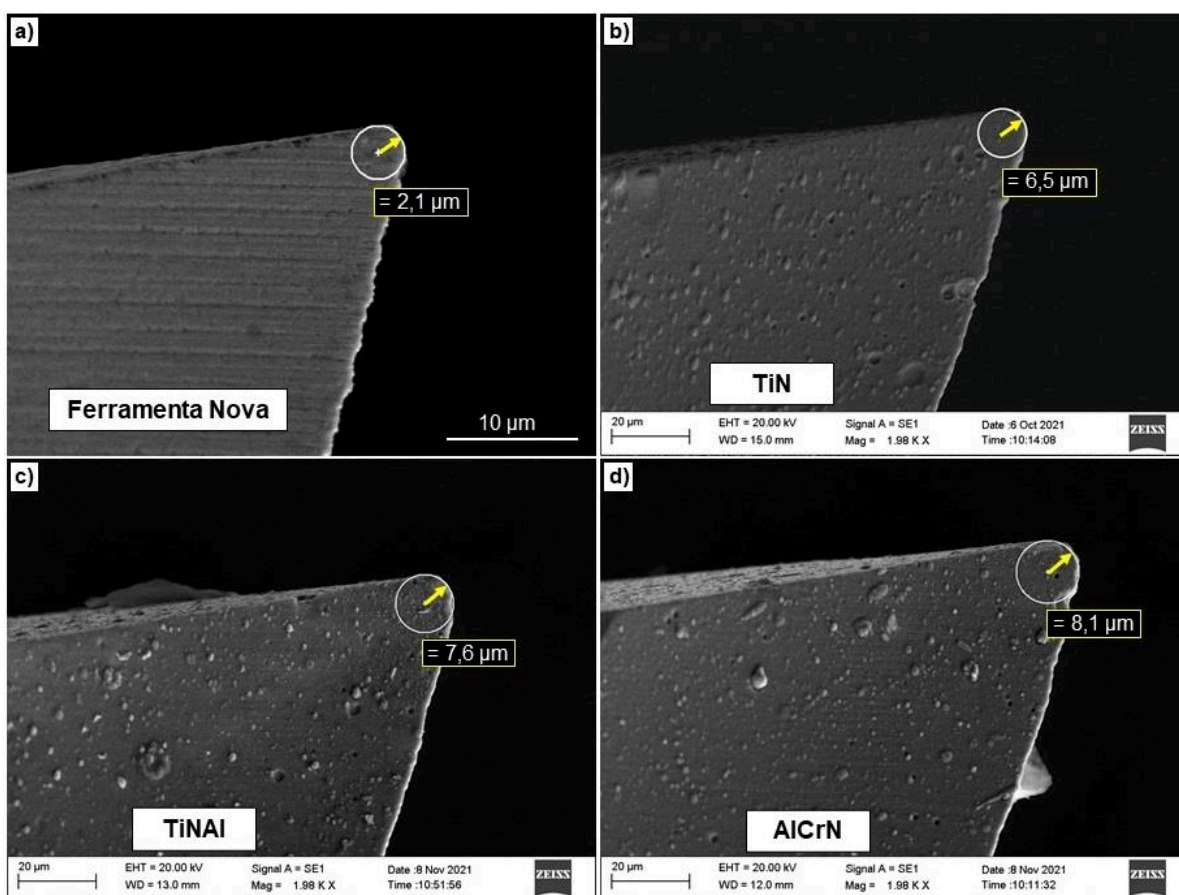


Figura 4.9 - Medição e arredondamento do raio de ponta, em (a) Ferramenta Nova; (b) Ferramenta com revestimento TiN; (c) Ferramenta com revestimento TiAlN e (d) Ferramenta com revestimento AlCrN.

Em paralelo ao desgaste de ponta, a outra forma de desgaste presente nos ensaios realizados foi o desgaste de flanco, considerado por Uzun; Aslantasi; Bedir (2013) a forma predominante em operações de microfresamento. Este é principalmente observado na superfície principal de folga, sendo provocado pelo atrito entre a peça e saída de cavacos, com a superfície de flanco da ferramenta (BOOTHROYD e KNIGHT, 1989). Na Figura 4.10 a seguir, são apresentadas imagens do desgaste de flanco nos diferentes tipos de ferramentas utilizadas neste trabalho, após a usinagem de 70 mm, em Fig. 4.10 (a) ferramenta nova (para comparação), (b) ferramenta sem revestimento a seco, Fig. 4.10 (c) ferramenta sem revestimento com MQL, Fig. 4.10 (d) ferramenta revestimento DLC a seco, Fig. 4.10 (e) ferramenta revestimento DLC com MQL, Fig. 4.10 (f) ferramenta revestimento AlCrN a seco, Fig. 4.10 (g) ferramenta revestimento AlCrN com MQL, Fig. 4.10 (h) ferramenta revestimento TiN a seco, Fig. 4.10 (i) ferramenta revestimento TiN com MQL, Fig. 4.10 (j) ferramenta revestimento TiAlN a seco, Fig. 4.10 (l) ferramenta revestimento TiAlN com MQL.

Vale ressaltar que tanto o arredondamento da ponta, quanto o desgaste de flanco apresentaram comportamento similar para as duas arestas de corte das microfresas. Não houve diferenciação em relação ao tipo de bloco usinado e também não foi observada uma tendência de melhoria do desgaste de flanco com a utilização de MQL. Assim como o resultado do desgaste medido através do diâmetro da ferramenta, o desgaste de flanco também foi maior nas ferramentas sem revestimento, seguido pelas ferramentas com revestimento DLC. As ferramentas com revestimento AlCrN, TiN e TiNAl apresentaram desgaste de flanco, na grande maioria dos testes, bem mais suaves ou praticamente inexistentes como ilustrados na Fig. 4.10 (f) e (l).

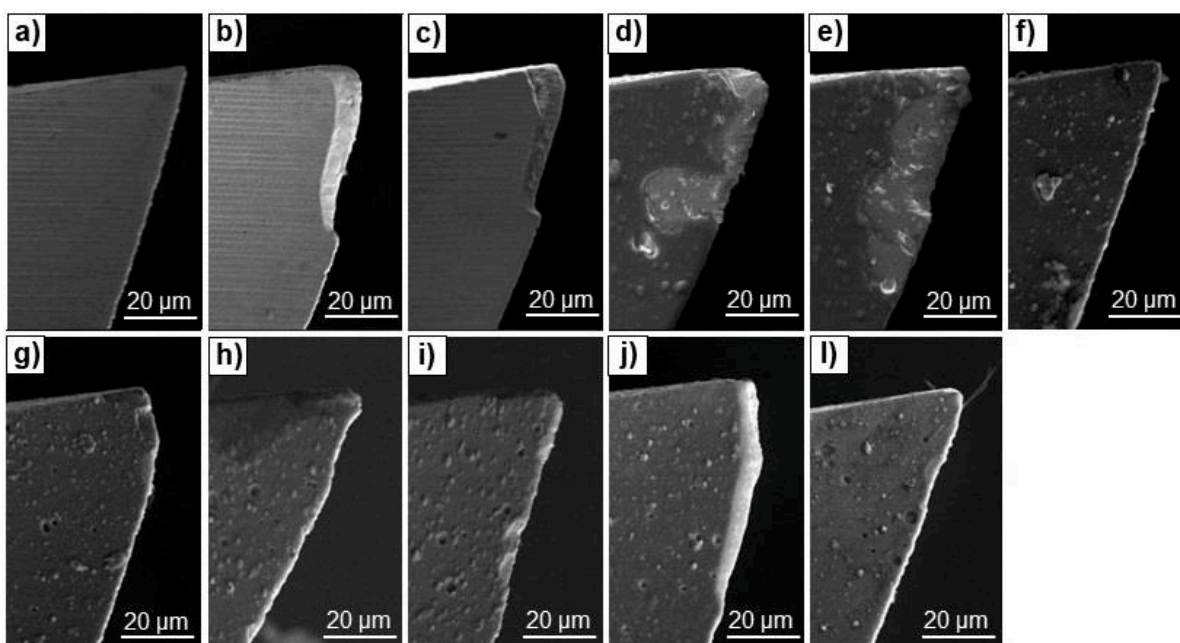


Figura 4.10 - Desgaste de flanco nos diferentes tipos de ferramentas, em (a) ferramenta nova; (b) sem revestimento a seco; (c) sem revestimento, MQL; (d) DLC a seco; (e) DLC, MQL; (f) AlCrN a seco; (g) AlCrN, MQL; (h) TiN a seco; (i) TiN, MQL; (j) TiNAl a seco; (k) TiNAl, seco; (l) TiNAl, MQL.

Apesar do desgaste de flanco ser comumente avaliado através da análise na superfície principal de folga no microfresamento, alguns pesquisadores têm relatado e investigado também a ocorrência deste na superfície secundária de folga (ASLANTAS et al, 2016; ALHADEFF et al, 2019). No presente trabalho, observou-se este tipo de desgaste apenas para as ferramentas com revestimento DLC, como pode ser observado na Fig. 4.11 (a) usinagem a seco e Fig. 4.11 (b) usinagem utilizando a técnica MQL. Para ambos os blocos S e C, houve uma melhoria significativa deste desgaste com a utilização da técnica MQL.

Resultado semelhante também foi encontrado por Chen et al. (2016), onde os autores observaram um elevado desgaste na superfície secundária de folga ao realizarem a microusinagem de cristais de LiF (fluoreto de lítio). Dos Santos (2020) na microusinagem da liga de titânio ti-6Al-4V, observou este mesmo desgaste com maior incidência ao utilizar ferramentas com revestimento, concluindo que, com o desgaste da ferramenta, o ângulo de posição secundário diminui, reduzindo conseqüentemente o ângulo de folga secundário, sendo este fato o causador do desgaste de flanco também na posição longitudinal da superfície secundária de folga. Ambos os trabalhos, sugerem que esse tipo de desgaste pode ser amenizado com o aumento do ângulo de posição secundário, fazendo com que o corte se concentre apenas na aresta principal.

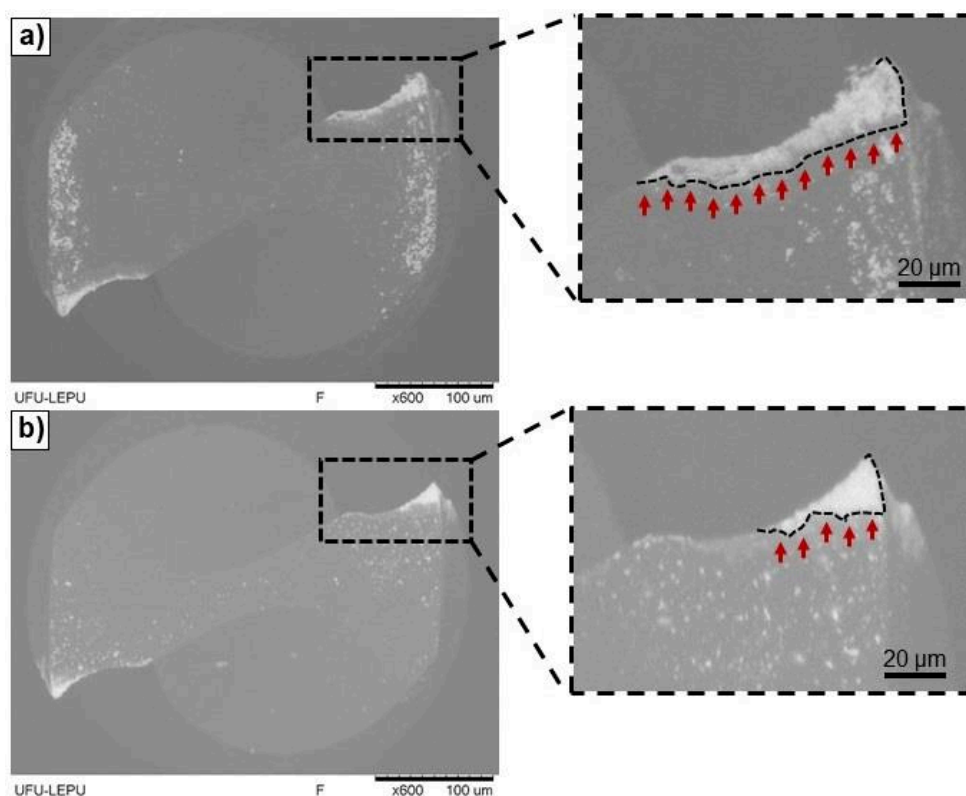


Figura 4.11 - Desgaste de flanco na superfície secundária de folga das ferramentas com revestimento DLC, em (a) usinagem a seco e (b) usinagem utilizando MQL.

Para a identificação dos mecanismos de desgaste, foram utilizadas apenas imagens das ferramentas obtidas pelo MEV, sendo este trabalho complexo em função das pequenas dimensões da ferramenta, conseqüentemente da dificuldade em posicionar a ferramenta de maneira adequada. No entanto, é possível identificar através das imagens apresentadas na Fig. 4.12, características do mecanismo conhecido como *Attrition* ou “adesão e arrastamento”, onde a utilização de baixas velocidades de corte, como por exemplo a

utilizada neste trabalho (37,3 m/min), contribuem para que o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torne irregular, desta forma, o material da peça é aderido na ferramenta e, ao desprender-se, fragmentos microscópicos são arrastados juntamente com o material (HUTCHINGS, 1996; TRENT e WRIGHT, 2000).

Já no primeiro passe (10 mm) e ao longo das imagens realizadas de forma padronizada após os comprimentos usinados de 30 mm, 50 mm e 70 mm foi possível identificar de forma aleatória a presença de material aderido na superfície de saída, em todas as ferramentas com revestimento, em Fig. 4.12 (a) ferramenta com revestimento TiN após 30 mm usinados, bloco S a seco; Fig. 4.12 (b) ferramenta com revestimento TiAl após 50 mm usinados, bloco C a seco; Fig. 4.12 (c) ferramenta com revestimento AlCrN após 70 mm usinados, bloco C a seco; Fig. 4.12 (d) ferramenta com revestimento DLC após 70 mm usinados, bloco C com MQL. Quando comparadas as condições em que foi identificado material aderido na ferramenta, não houve uma tendência clara de aumento ou diminuição em função do tipo de bloco usinado.

Outro detalhe em relação ao mecanismo de “adesão e arrastamento” é que ele pode ocorrer com ou sem a presença de aresta postiça de corte (APC) conforme descrito por Machado et. al (2011). No entanto, apesar de vários trabalhos proporem a ocorrência de APC, sua comprovação na microusinagem é difícil em função da falta de uma metodologia adequada para análises mais aprofundadas, como por exemplo as técnicas de *Quick-Stop* utilizadas na usinagem convencional, onde o processo de corte é interrompido repentinamente, deixando a raiz do cavaco em condições favoráveis a esta análise (CHERN, 2005).

Comumente em trabalhos de microusinagem, a ocorrência de APC é suposta em função da presença de partículas de material aderidas de forma sequenciada e periódica ao fundo do canal usinado. Neste trabalho, a utilização de MQL na grande maioria dos ensaios, favoreceu a diminuição da ocorrência de material aderido na ferramenta (superfícies principais de folga e superfícies de saída das ferramentas) e também a diminuição de partículas aderidas ao fundo do canal, que teoricamente evidenciam a formação de APC. Ressalta-se que estes assuntos serão abordados de forma detalhada posteriormente neste trabalho.

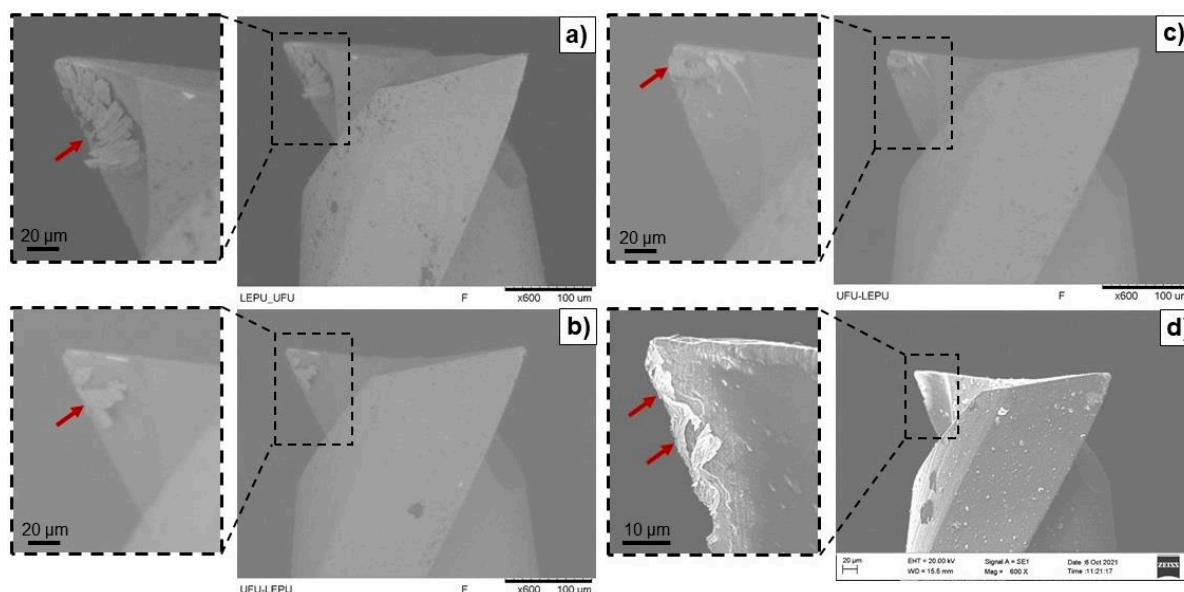


Figura 4.12 - Presença de material aderido na superfície de saída de ferramentas com revestimento, em (a) TiN, 30 mm usinados, bloco S a seco; (b) TiAlN, 50 mm usinados, bloco C a seco; (c) AlCrN, 70 mm usinados, bloco C a seco; (d) DLC, 70 mm usinados, bloco C com MQL.

Ao observar o desgaste medido através da redução do diâmetro das ferramentas, pode-se concluir que as ferramentas sem revestimento se desgastaram em maiores proporções, quando comparadas as ferramentas com revestimento. Através das imagens apresentadas na Fig. 4.13 é possível identificar em (a) um cavaco de comprimento muito longo, aderido a superfície de saída (indicado pelas setas vermelhas) e uma grande quantidade de material aderida na ponta da ferramenta. O mesmo se repete na Fig. 4.13 (b) onde também é observado um cavaco aderido na superfície de saída da ferramenta.

A fim de comprovar que o material aderido na ferramenta era realmente o material usinado, foram realizadas análises por meio de EDS, comparando essa composição com outros pontos das ferramentas. Nas ampliações indicadas na Fig. 4.13 (a) e (b) é possível observar os pontos analisados e identificados como “Spectrum 1”, em ambas as tabelas de composição constata-se elementos característicos do aço inoxidável 316L com destaque para as porcentagens de cromo típicas deste material. Nos pontos identificados como “Spectrum 2” são observados em maior proporção os componentes carbono, tungstênio e cobalto (usado como ligante), característicos do metal duro (carboneto de tungstênio) e em menor proporção (Fig. 4.13 (b)) cromo, ferro e níquel, que também são comuns na composição deste, afim de melhorar suas propriedades (TORRES, 2009). A porcentagem de oxigênio, se deve à ineficiência do equipamento utilizado em deixar apenas o vácuo durante a análise.



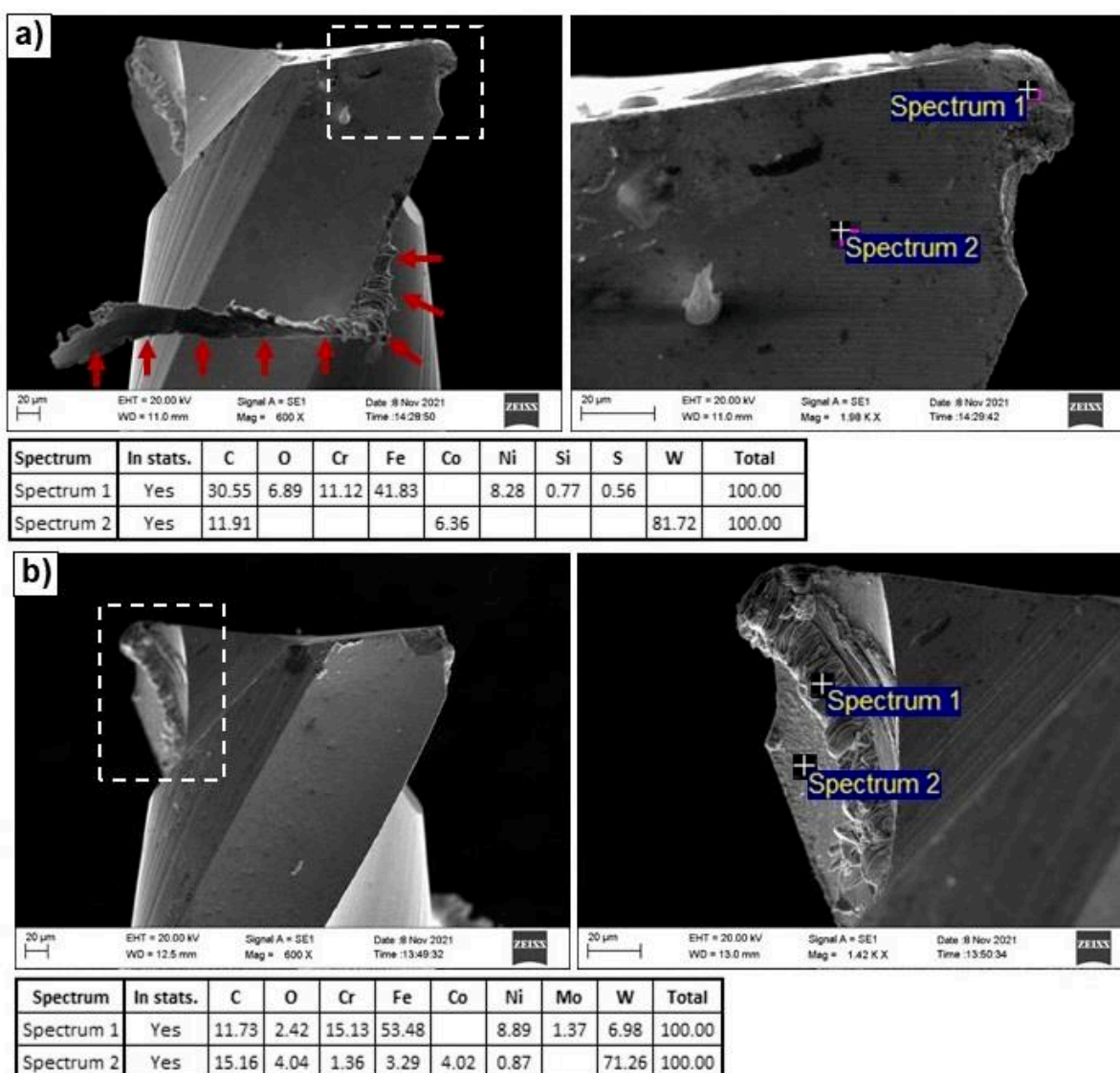


Figura 4.13 - Cavacos aderidos a ferramentas sem revestimento, em (a) EDS realizado superfície principal de folga; (b) EDS realizado superfície de saída.

Outro mecanismo de desgaste identificado principalmente nas ferramentas sem revestimento foi o lascamento na aresta de corte, que pode ser atribuído à forte adesão de material da peça nas ferramentas sem revestimento, conforme mostrado anteriormente. Assim, ao desprender-se o material aderido arranca partículas maiores da ferramenta, arrastando-as junto a ele. Na Figura 4.14 é possível a observação da ocorrência de lascamento em várias arestas de corte de ferramentas sem revestimento, utilizadas a seco e com MQL, após a usinagem de 70 mm.

Destaca-se que este mecanismo foi identificado como o principal causador do desgaste acelerado, conseqüentemente maior (após 70 mm usinados), nas microferramentas sem revestimento. No entanto, nos canais usinados em ambos os blocos

e nas condições a seco e MQL, foram observados acabamentos superficiais mais suaves, em sua grande maioria com valores de rugosidade inferiores às superfícies usinadas por ferramentas com revestimento, além de uma menor incidência de formação de rebarbas. Constatou-se também que, apesar da alta evidência de material aderido às ferramentas, praticamente não foram identificadas partículas de material aderidas nos fundos dos canais, características da formação de APC. Este assunto será abordado em detalhes na seção 4.2.2 deste trabalho.

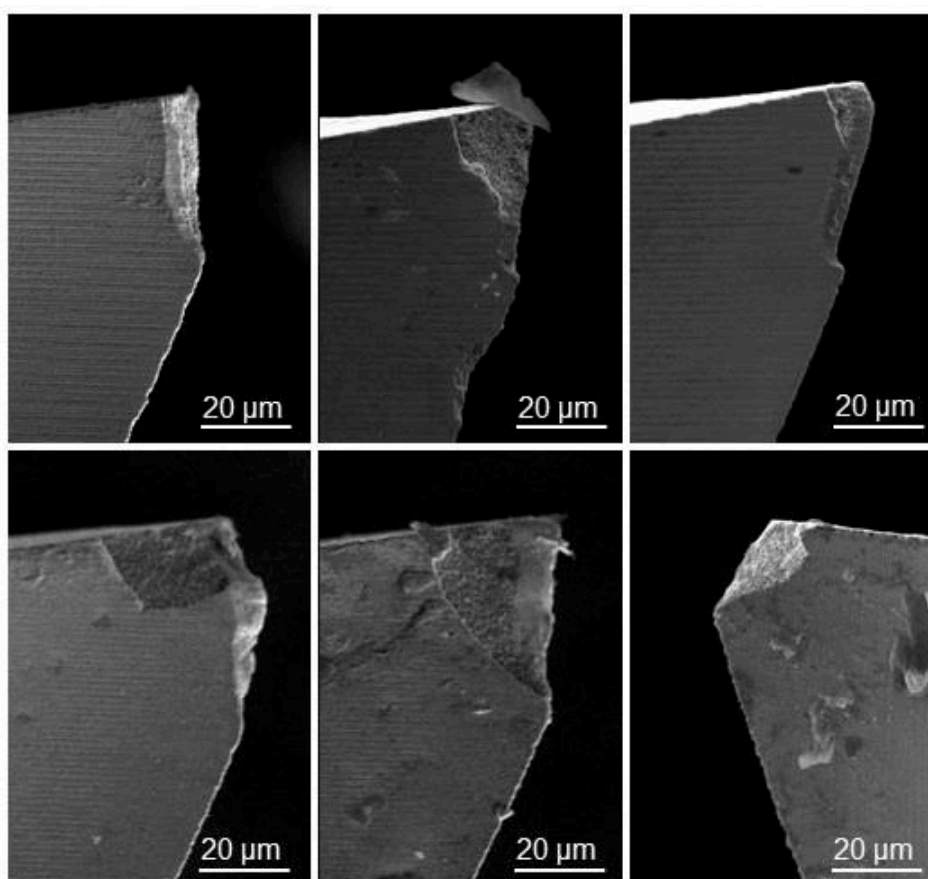


Figura 4.14 - Evidência de lascamento em várias arestas de corte de ferramentas sem revestimento, após a usinagem de 70 mm.

Resultados semelhantes de altos valores de desgastes de ferramentas sem revestimento, foram observados por Sadiq et al. (2018), medidos através da diminuição da largura dos canais, na usinagem de Inconel 718 (IN718) fabricado por SLM. Os autores concluíram que as ferramentas de metal duro sem revestimento, não eram adequadas em função do desempenho insatisfatório, resultando em desgaste excessivo e muitas partículas de APC aderidas à superfície fresada. No entanto, relataram que os revestimentos NanoTek (AlTiN /Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) e AlTiN, tiveram bom desempenho, prolongando a vida útil das ferramentas,

apesar da necessária utilização de velocidades de corte menores em comparação com as que poderiam ser utilizadas em materiais convencionais (extrudados / laminados). Atribuíram este fato a maior dificuldade de se usinar IN718 SLM, por este conter poros e escórias duras entre as camadas, características dos materiais obtidos por este processo de manufatura aditiva.

Em relação ao acelerado desgaste das ferramentas sem revestimento, observadas neste trabalho, acredita-se que caso continuassem usinando, apresentariam avarias catastróficas de maneira repentina e inesperada, em função dos choques mecânicos e térmicos inerentes ao processo de microfresamento. No entanto, não se descarta totalmente o uso delas (para pequenos comprimentos usinados e em operações de faceamento apenas), visto que a usinagem de acabamento é aplicada quando os parâmetros de tolerância e/ou acabamento superficial forem críticos. Assim, apesar de não atenderem aos parâmetros de tolerância de forma rígida, devido à diminuição do seu diâmetro, atendem em maior grau à melhoria do acabamento superficial, apresentando menores rugosidades, menor incidência de rebarbas e partículas aderidas a superfície fresada, quando comparadas às ferramentas com revestimento testadas neste trabalho.

As ferramentas com revestimentos TiN, TiAlN e AlCrN, exibiram bons resultados em termos de desgaste, não ocorrendo fragmentação nem lascamento. Este resultado de desempenho superior, comparado às ferramentas sem revestimento, é compatível ao encontrado na literatura, onde afirma-se que a utilização de ferramentas com revestimento geralmente reduz a ocorrência deste tipo de desgaste (ARAMCHAROEN et al, 2008; UCUN, ASLANTAS e BEDIR, 2013; ASLANTAS et al, 2016). No entanto, as ferramentas com revestimento DLC apresentaram um comportamento diferente, com perda de coesão do revestimento no substrato de metal duro, causando o destacamento do revestimento e o desgaste pelo mecanismo de “adesão e arrastamento”.

Na Figura 4.15 é apresentada uma imagem da ferramenta revestida com DLC, utilizada na microusinagem do bloco S, na condição a seco, após 70 mm usinados. Na imagem são exibidas duas regiões em detalhes, na Fig. 4.15 (a) é mostrada a ampliação da superfície de saída da ferramenta, onde é possível observar o substrato exposto (região mais clara) em contraste com a região mais escura característica do revestimento. Na Fig. 4.15 (b) é mostrada a ampliação da ponta da ferramenta, identificadas as regiões de substrato e revestimento, sendo possível a medição da espessura do revestimento exposto através do MEV, em torno de 1,4  $\mu\text{m}$ , conforme indicado na superfície secundária de folga.



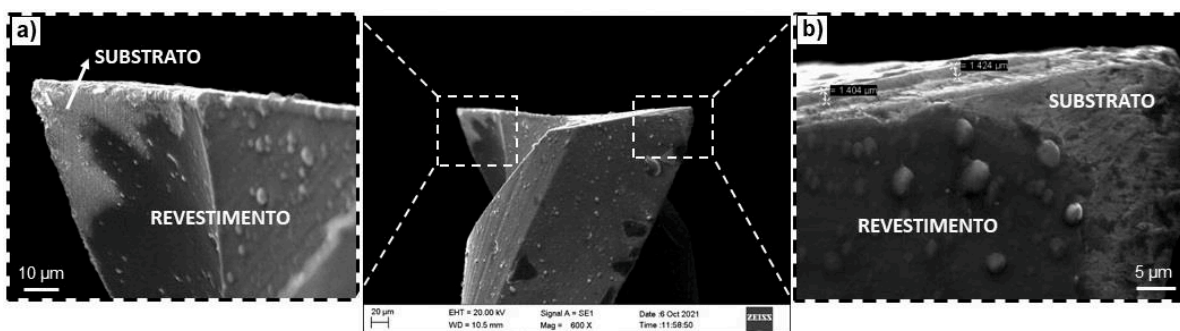


Figura 4.15 - Perda de coesão do revestimento DLC no substrato de metal duro, em (a) ampliação da superfície de saída; (b) ampliação da ponta da ferramenta.

Devido a perda de coesão e fragmentação do revestimento, o substrato da ferramenta ficou exposto à adesão de material da peça e à formação de APC, resultando em um cisalhamento permanente deste e ao maior volume de partículas aderidas à superfície fresada (apresentado em detalhes da seção 4.2.2 deste trabalho). A fim de identificar os componentes presentes nas diferentes regiões observadas, foram realizadas três análises por EDS na ferramenta revestida com DLC (Fig. 4.16), utilizada na microusinagem do bloco C, na condição a seco, após 70 mm usinados. Na tabela de composição, em “Spectrum 1” foram identificados componentes do aço inoxidável 316L comprovando que realmente se trata do material da peça de trabalho aderido à ferramenta de corte. Em “Spectrum 2” são observados em maior proporção os componentes carbono e tungstênio, característicos do metal duro e demais elementos ligantes. Em “Spectrum 3” é observado em maior proporção o carbono (cerca de 42%) que é a base das camadas do revestimento DLC. E mais uma vez a porcentagem de oxigênio obtida nas análises, se deve à ineficiência do equipamento utilizado em formar vácuo completo.

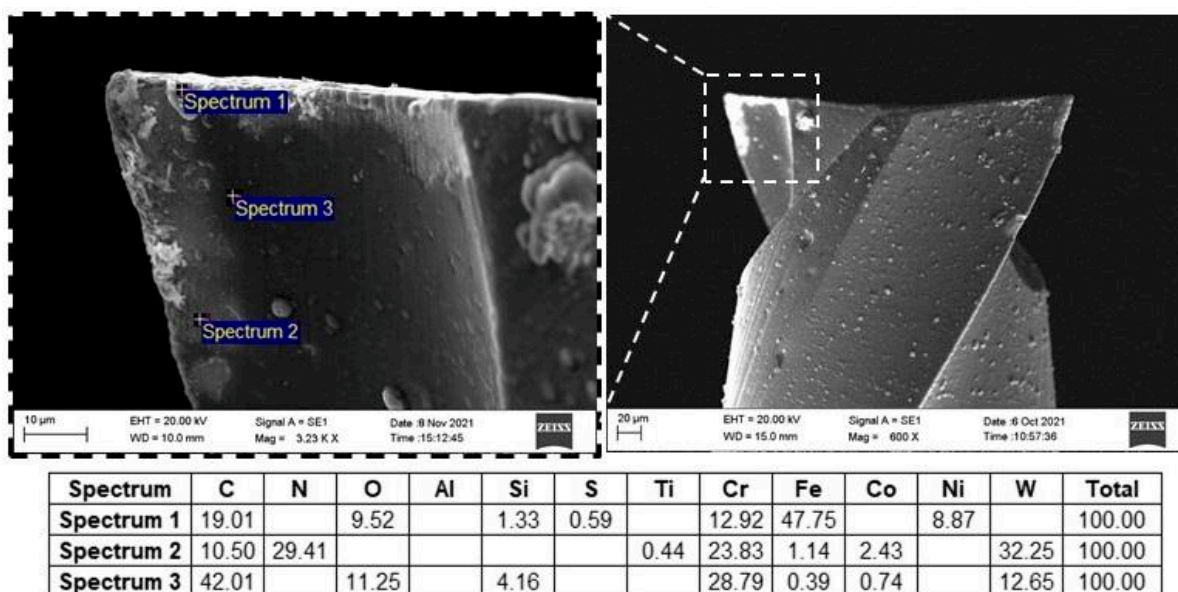


Figura 4.16 - EDS realizado em ferramenta revestida com DLC.

Ao comparar os resultados medidos e observados de desgaste entre as ferramentas utilizadas neste trabalho, é possível concluir que o revestimento DLC teve o penúltimo desempenho, perdendo apenas para as ferramentas sem revestimento. Este resultado é diferente do esperado, visto que o DLC é uma forma metaestável do carbono amorfo, o qual contém proporções de carbono  $sp^2$  e  $sp^3$  que lhe conferem uma combinação de propriedades características do diamante e do grafite, como por exemplo, baixo coeficiente de atrito, elevada dureza e elevada resistência ao desgaste (RIBEIRO, 2012; ARAÚJO, 2017). Além disso, os revestimentos DLC despertam grande interesse comercial, justamente por suas propriedades autolubrificantes, eficazes na diminuição do desgaste e atrito (MIYOSHI, 2001).

Em vários trabalhos de microusinagem com foco na comparação de ferramentas com diferentes revestimentos, os DLC's foram apontados como destaque por seu excelente desempenho, não só em relação ao desgaste, mas também em relação a outros parâmetros. Uzun, Aslantas e Bedir (2013) ao compararem os revestimentos TiAlN+AlCrN, DLC, AlTiN, TiAlN+WC/C e AlCrN na microusinagem de Inconel 718, concluíram que o DLC foi o que obteve melhor desempenho, por prolongar a vida da microferramenta, melhorar o acabamento da superfície usinada e reduzir a formação de APC. Em um estudo posterior, Uzun, Aslantas e Bedir (2015) concluíram que as propriedades provenientes dos componentes químicos do DLC, como por exemplo o baixo coeficiente de atrito, ofereceram vantagens no processo de corte, reduziram a formação de APC, além de diminuir efetivamente a força de corte de 8 N para 6 N, quando comparadas às ferramentas sem revestimento. Ziberov, et al. (2020) compararam ferramentas com revestimento TiAlN e DLC

às ferramentas sem revestimento, no microfresamento de Ti-6Al-4V e observaram o menor desgaste para as ferramentas com revestimento DLC nas condições de usinagem a seco, chegando a uma redução de desgaste de 640%, quando comparadas às microferramentas revestidas com TiAlN e 267% comparadas às microferramentas sem revestimento.

O revestimento DLC tem sido estudado extensivamente como revestimento tribológico e apesar das propriedades benéficas anteriormente descritas, estes apresentam valores elevados de tensões internas que afetam sobretudo a sua adesão ao substrato. Uma das formas de melhorar essa limitação é através da dopagem da matriz com elementos metálicos formadores de carbonetos, tais como Ti, W e Cr, que conduzem a diminuição das tensões e a um aumento da dureza dos revestimentos. No entanto, a incorporação destes metais acima de 30 – 40% pode ser desafiadora, pois o aumento excessivo da dureza torna os filmes frágeis (RIBEIRO, 2012). Ao observar a análise dos componentes do revestimento por EDS, apresentada na Fig. 4.16 percebe-se uma porcentagem de Cr de aproximadamente 29 %, muito próxima a faixa descrita como problemática. Assim pode-se concluir que talvez, um dos fatores responsáveis pelo baixo desempenho dos revestimentos DLC's, seja a alta concentração de cromo que de alguma forma fragilizou o revestimento.

Outro fator importante descrito por Hauert (2004) é que a adesão da camada de transferência depende da condição química da superfície do contra corpo, das condições tribológicas e das condições ambientais, como por exemplo a humidade relativa do ambiente. Outra possibilidade para o baixo desempenho é que talvez tenha ocorrido algum erro no processo de produção da ferramenta, como por exemplo os citados anteriormente, que diminuíram a qualidade do revestimento depositado, tornando-o mais propenso à perda de coesão e destacamento.

## **4.2. Qualidade Superficial**

Nessa seção serão apresentados e analisados os resultados referentes à qualidade superficial, obtidos nos experimentos. Para tanto, são exibidos os valores medidos dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rz, Rt, Rsk, Rku, agrupados por bloco (S e C) nas condições a seco e com a utilização de MQL.

Logo em seguida, serão apresentadas as características observadas nas superfícies microusinadas, através de imagens dos canais obtidas pelo MEV.

#### 4.2.1. Rugosidade

A fim de facilitar a visualização e análise da microgeometria, conforme detalhado no Capítulo III, Item 3.5.2, os resultados mostrados graficamente para os diversos parâmetros de rugosidade, representam a média das medições realizadas no intervalo de confiança de 95,45 %.

A Figura 4.17 apresenta os gráficos relativos à rugosidade média Ra e Rq. Ressalta-se que Ra é o parâmetro mais utilizado em trabalhos científicos de microusinagem, permitindo comparação entre resultados com outras pesquisas. Em Fig. 4.17 (a) primeiramente são apresentadas as rugosidades médias obtidas na microusinagem do Bloco S, na condição a seco. Observa-se que o menor resultado foi de  $0,19 \pm 0,06 \mu\text{m}$ , obtido nos canais realizados com o revestimento DLC e o maior resultado  $0,43 \pm 0,10 \mu\text{m}$  obtido com o TiN. Ao comparar diretamente esses resultados, com os resultados obtidos na usinagem do Bloco S utilizando MQL (Fig. 4.17 (b)), observa-se que, de uma maneira geral as rugosidades obtidas tiveram uma tendência a diminuição, sendo o menor resultado medido de  $0,12 \pm 0,02 \mu\text{m}$ , obtido nos canais realizados com a ferramenta sem revestimento e o maior resultado  $0,24 \pm 0,02 \mu\text{m}$  obtido com o TiNAl. Destaca-se a redução de aproximadamente 56 % da média dos valores de Ra, quando utilizando TiN com MQL.

Na Figura 4.17 (c) é mostrado o gráfico das rugosidades médias obtidas na microusinagem do Bloco C, na condição a seco. O menor resultado foi medido nos canais realizados com a ferramenta sem revestimento ( $0,19 \pm 0,04 \mu\text{m}$ ) e o maior resultado para a ferramenta com revestimento TiNAl ( $0,24 \pm 0,06 \mu\text{m}$ ). Ao comparar diretamente esses resultados, com os resultados obtidos na usinagem do Bloco C utilizando MQL (Fig. 4.17 (d)), não é identificada a mesma tendência geral à diminuição das rugosidades observada na microusinagem do Bloco S (seco / MQL). Pode-se destacar de forma isolada essa tendência apenas para as ferramentas sem revestimento e com revestimento TiN, sendo o menor valor observado para os canais realizados com a ferramenta sem revestimento ( $0,14 \pm 0,04 \mu\text{m}$ ) e o maior resultado para a ferramenta com revestimento TiNAl ( $0,24 \pm 0,04 \mu\text{m}$ ).

Ao comparar os valores de Ra do Bloco S, na condição a seco com o Bloco C, também na condição a seco, é perceptível a diminuição das médias das rugosidades no Bloco C, para todas as ferramentas utilizadas. Porém ao comparar os valores do Bloco S com os do Bloco C, ambos utilizando MQL, observa-se de forma mais sutil, menores rugosidades encontradas no bloco S. Comparando a média dos valores obtidos em todos os experimentos realizados no Bloco S (seco e MQL) diretamente com os realizados no

Bloco C, pode-se afirmar que o Bloco C em geral, favoreceu à obtenção de menores rugosidades.

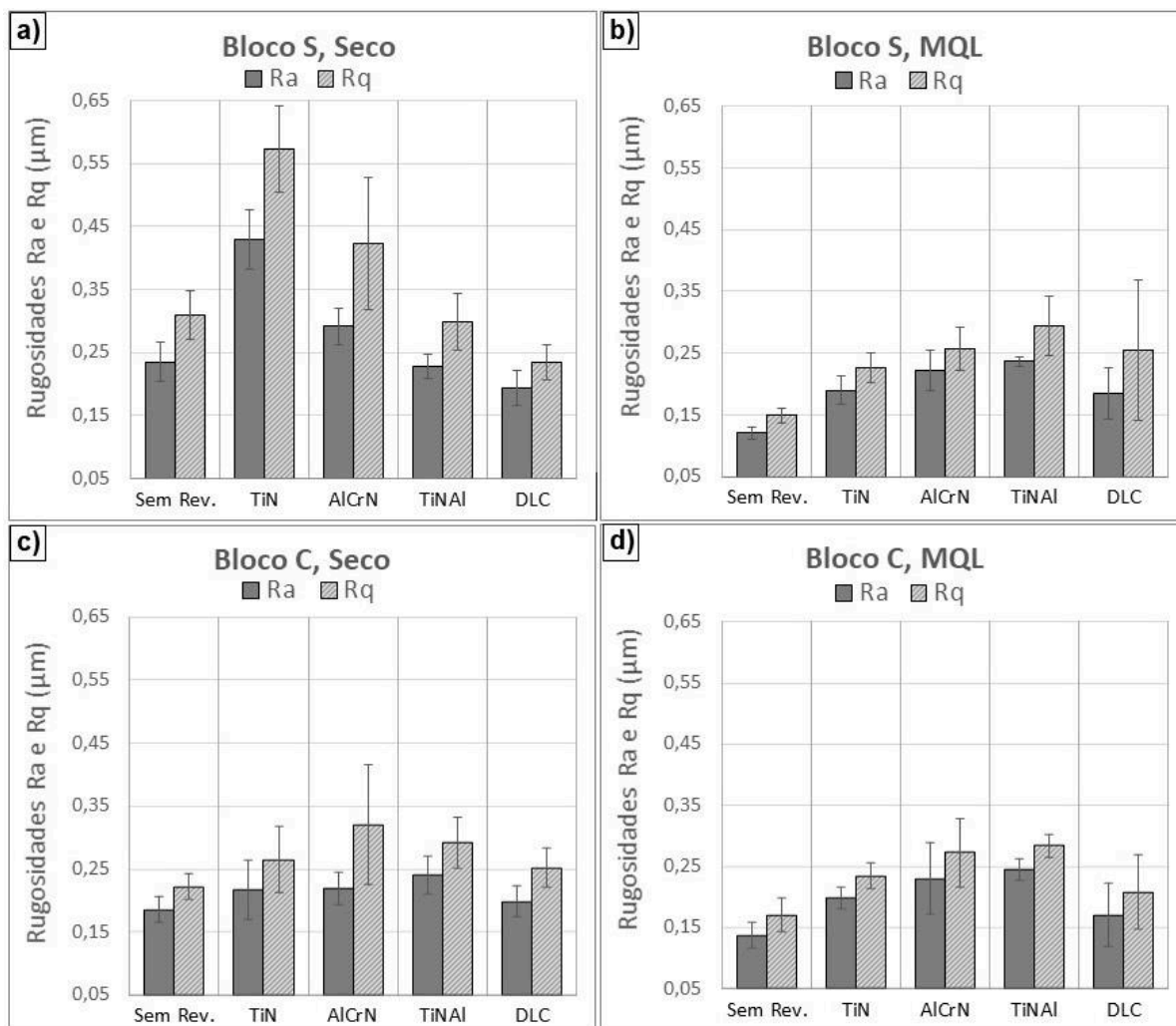


Figura 4.17 - Média das rugosidades Ra e Rq, em (a) Bloco S, Seco; (b) Bloco S, MQL; (c) Bloco C, Seco; (d) Bloco C, MQL.

De uma maneira geral, as menores médias de valores de Ra, foram obtidas para as ferramentas sem revestimento, variando de 0,12 a 0,24  $\mu\text{m}$ . Isoladamente no canal 6 do bloco S, utilizando MQL, foi observada a menor rugosidade medida ( $0,10 \pm 0,00 \mu\text{m}$ ). Resultado semelhante foi encontrado por Gomes, Da Silva e Duarte (2020) ao realizarem o microfresamento de aço inoxidável austenítico 316L fabricado por DED, onde os valores de Ra variaram entre 0,12 a 0,32  $\mu\text{m}$ . Ji et al. (2021) também obtiveram resultados parecidos onde o Ra variou entre 0,10 a 0,20  $\mu\text{m}$  na microusinagem de IN718 (SLM), com destaque para o fato de que os valores medidos na usinagem de IN718 (convencional), utilizando as mesmas condições de corte foram superiores (0,14 a 0,35  $\mu\text{m}$ ).

Observando ainda a Fig. 4.17, o pior resultado obtido em relação a amplitude dos valores de Ra foi observado para as ferramentas com revestimento TiN de 0,19 a 0,43  $\mu\text{m}$ . Ao comparar os resultados em relação ao tipo de bloco e utilização ou não do fluido, o pior desempenho foi das ferramentas com revestimento TiNAl, sendo o maior valor medido em 3 dos 4 possíveis resultados, no entanto, sua amplitude foi muito baixa variando 0,23 a 0,24  $\mu\text{m}$ , o que demonstra estabilidade do comportamento do revestimento em relação a todos os parâmetros variados neste trabalho. No entanto, até mesmo os valores mais elevados de rugosidades encontrados neste trabalho podem ser consideradas baixos quando comparadas a outros estudos, como por exemplo Parenti et al. (2019) ao usinarem aço inoxidável 316L fabricado por ME em estado verde, encontraram resultados variando entre 1,4 a 2,8  $\mu\text{m}$  e Kuriakose et al. (2018) ao realizarem a microusinagem de aço inoxidável 316L com ligante polimérico, também fabricado por ME, obtiveram rugosidades de 1,57 a 2,66  $\mu\text{m}$ . Khan, et al. (2018) realizaram a usinagem de Inconel 718 SLM, com ferramentas sem revestimento e MQL, obtendo uma redução significativa da rugosidade Ra de 17  $\mu\text{m}$  (superfície impressa) para 1,5  $\mu\text{m}$  após o microfresamento. Sadiq et al. (2018) também realizaram a microusinagem de IN718 fabricado por SLM, utilizando ferramentas sem revestimento, com revestimento NanoTek (AlTiN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) e AlTiN, encontrando no geral, valores de Ra que variaram entre 1,5  $\mu\text{m}$  a 5,5  $\mu\text{m}$ . Os autores concluíram que as ferramentas sem revestimento não eram adequadas em função dos altos valores de rugosidade e que o revestimento NanoTek superou o revestimento AlTiN, prolongando a vida útil da ferramenta e gerando acabamento superficial mais suave. Relataram ainda que os defeitos superficiais da amostra SLM, como poros e escórias, prejudicaram o acabamento superficial, limitando a eficácia deste.

Apesar dos maiores valores de rugosidade Ra relatados anteriormente, Berestovskyi e Hung (2013) afirmam que o microfresamento híbrido em aço inoxidável, nitinol e titânio, permitem a obtenção de superfícies com valores de Ra inferiores a 100 nm, no entanto, para o aço inoxidável 316L fabricado por SLM ou outro processo de MA, não foram encontrados na literatura valores que se enquadrem nesta afirmação. Entretanto, De Oliveira Campos et al. (2020) ao estudarem a microusinagem de Ti6Al4V fabricado por SLM em comparação direta com Ti6Al4V comercial, utilizando ferramentas de metal duro, sem revestimento, obtiveram a grande maioria dos valores medidos abaixo de 100 nm, com destaque para valores isolados de 40 nm a 50 nm em ambas as amostras. Concluíram que, em geral, a amostra SLM apresentou menores valores de rugosidade superficial em função do menor desgaste da ferramenta.

Apesar da rugosidade Ra ser o parâmetro mais utilizado em estudos de microusinagem, esta não consegue distinguir picos e vales atípicos, podendo ocultar alguns

defeitos. Complementar a esta, a rugosidade  $R_q$  também foi medida e é apresentada em conjunto na Fig. 4.17. Ambos os parâmetros  $R_a$  e  $R_q$ , representam rugosidades médias e estão matematicamente interligados. No entanto,  $R_q$  por elevar ao quadrado o erro tem o efeito de dar peso extra para altos valores, sendo, portanto, mais sensível as variações de superfície. Quando a superfície não possui grandes picos e vales isolados, é comum que o comportamento de  $R_q$  seja semelhante a  $R_a$ , porém com valores um pouco mais altos, seguindo as mesmas tendências de aumento ou diminuição. Ao observar os valores de  $R_q$  apresentados na Fig. 4.17, percebe-se que a grande maioria dos resultados apresentados, em todas as condições e ferramentas, se enquadram dentro deste contexto de similaridade. No entanto, alguns resultados chamam a atenção em função de valores médios muito superiores aqueles de  $R_a$  e/ou pelos maiores valores de desvio padrão (exibidos por meio da barra de erros), que refletem a baixa repetibilidade das medições, sendo estes observados para as ferramentas TiN e AlCrN (Bloco S, seco), DLC (Bloco S, MQL) e AlCrN (Bloco C, seco). Ressalta-se que estes resultados podem sugerir a ocorrência de grandes picos e vales, no entanto, assim como  $R_a$ , este parâmetro tem como desvantagem o fato de não definir a forma das irregularidades, sendo necessário a análise em conjunto com outros parâmetros ou outros recursos, como por exemplo as imagens de MEV, que serão analisadas na sessão 4.2.2 deste trabalho.

A média dos valores de  $R_t$  e  $R_z$  também foram avaliados e são apresentados em conjunto na Fig. 4.18. A rugosidade total ( $R_t$ ) é calculada entre a distância vertical do pico mais alto e do vale mais profundo, enquanto o  $R_z$  considera a média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial, considerando também os maiores picos e maiores vales do perfil, porém observados no comprimento de amostragem (*cut-off*). Os valores de  $R_t$  e  $R_z$  são diferentes entre si, visto que, não necessariamente o maior pico e o maior vale de um perfil avaliado se encontram no mesmo comprimento de amostragem, sendo o  $R_t$  normalmente maior ou igual ao  $R_z$ , por abranger todo o comprimento de avaliação. As maiores distancias entre picos e vales tanto na análise  $R_t$  quanto  $R_z$ , foram observadas para quase todas as ferramentas utilizadas no bloco S na condição a seco, exceto a ferramenta com revestimento DLC, com parâmetros ligeiramente maiores obtidos no bloco C, seco. De uma maneira geral, o uso de MQL favoreceu a diminuição destes parâmetros, observado de forma mais acentuada no bloco S.

Os valores de  $R_t$  apresentados na Fig. 4.18 variaram (em módulo) entre o menor valor de  $0,91 \mu\text{m}$  para a ferramenta sem revestimento, na usinagem do bloco S (MQL) e o maior de  $4,17 \mu\text{m}$  para a ferramenta com revestimento TiN, na usinagem do bloco S (seco). A grande maioria dos resultados situou-se abaixo de  $2 \mu\text{m}$ , sendo considerados valores baixos, normalmente obtidos por ferramentas afiadas, de acordo com Shaw (1986). Os

menores e maiores valores de Rz (em módulo), também foram obtidos para as mesmas ferramentas, sendo o menor 0,80  $\mu\text{m}$  e o maior 3,32  $\mu\text{m}$ . Mais uma vez, destaca-se a baixa repetibilidade das medições dos resultados obtidos para as ferramentas TiN e AlCrN (Bloco S, seco), DLC (Bloco S, MQL) e AlCrN (Bloco C, seco), reforçando a baixa homogeneidade do acabamento superficial obtido entre os canais e comprovando também, a presença de grandes picos e vales atípicos, encontrados de forma esporádica.

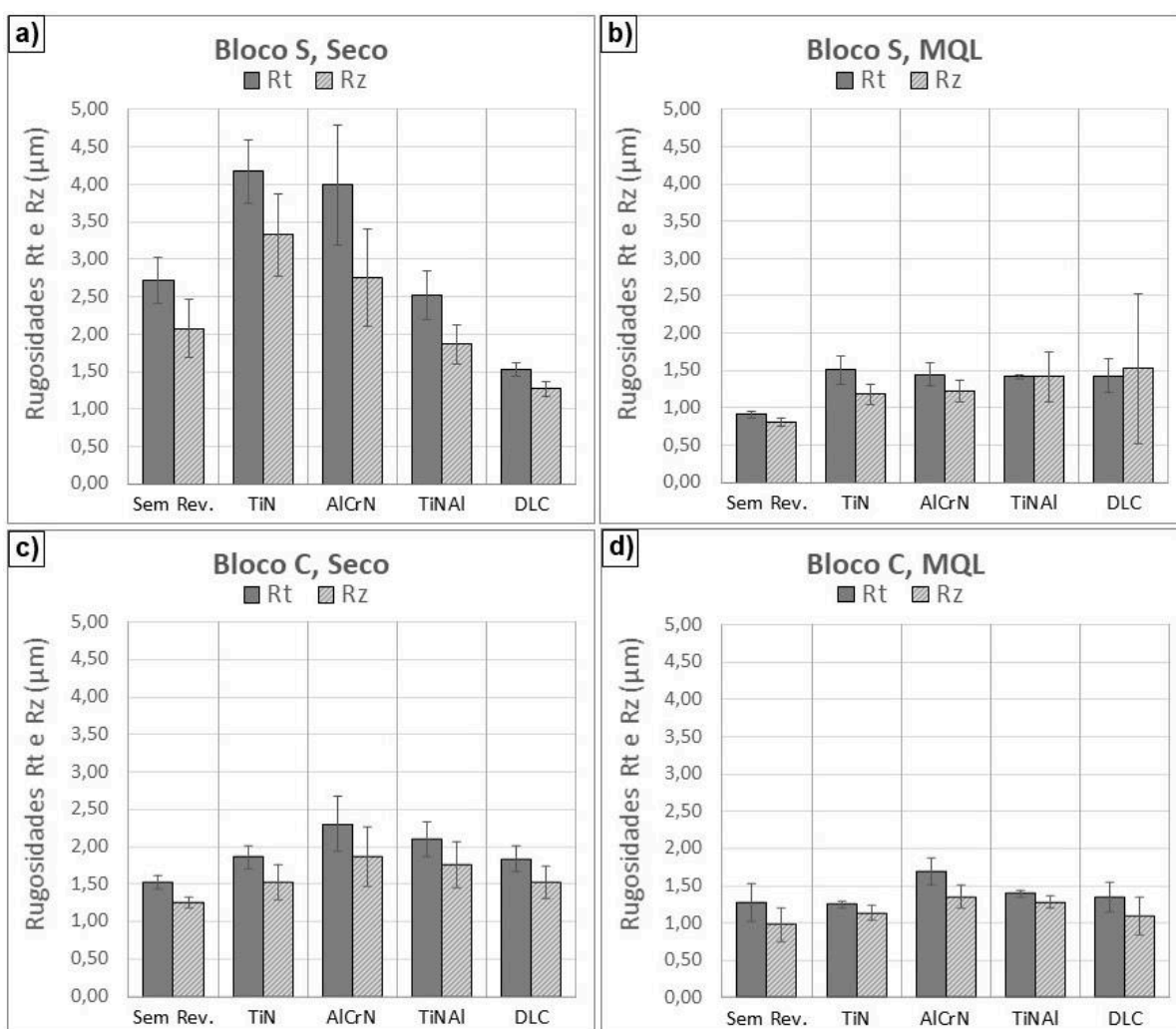


Figura 4.18 - Média das rugosidades Rt e Rz, em (a) Bloco S, Seco; (b) Bloco S, MQL; (c) Bloco C, Seco; (d) Bloco C, MQL.

Os fatores de assimetria (*Skewness* – Rsk) e de achatamento (*Kurtosis* – Rku) do perfil de rugosidade dos canais também foram avaliados, sendo os resultados apresentados na Fig. 4.19. Rsk analisa a posição relativa do perfil de acordo com a linha média, devendo ser associado com outros parâmetros, como por exemplo Rku, a fim de que o perfil possa ser melhor caracterizado. Já o parâmetro Rku mede a convexidade de achatamento do perfil



da superfície. Destaca-se que, ambos os parâmetros são adimensionais e dependentes de  $R_q$ , utilizado como base para os respectivos cálculos.

Na Figura 4.19 é possível observar que nos Blocos S e C, na condição de usinagem a seco (Fig. 4.19 (a) e (c)) todos os valores obtidos foram positivos, variando de  $0,29 \pm 0,11$  (Ferramenta sem revestimento, bloco C, seco) a  $1,71 \pm 0,66$  (Ferramenta AlCrN, bloco S, seco), o que indica que os perfis dos canais medidos possuem em média mais picos do que vales. Porém, quando observados os resultados dos Blocos S e C, na condição de usinagem utilizando a técnica MQL (Fig. 4.19 (b) e (d)), são encontrados dois resultados negativos:  $-0,17 \pm 0,03$  (Ferramenta sem revestimento, bloco S, MQL) e  $-0,02 \pm 0,01$  (Ferramenta TiNAl, bloco C, MQL) indicando que estes canais possuem mais vales do que picos. Fazendo ainda uma comparação direta entre os Blocos S e C, na condição de usinagem utilizando MQL, percebe-se que de uma maneira geral, os resultados são muito próximos a zero (exceto para ferramenta DLC), o que indica boa simetria de formação de picos e vales, com distribuição semelhante ao modelo normal.

Normalmente em trabalhos de microusinagem, quando observados baixos valores de rugosidade  $R_a$  vinculados a maiores desgastes das ferramentas, normalmente atribui-se o fato ao maior arredondamento da ponta da ferramenta, que usina de forma similar a uma ferramenta com aresta raspadora, em que os picos são alisados, predominando os vales na superfície avaliada. Ao observar os resultados de  $R_{sk}$  para as ferramentas sem revestimento (que apresentaram o maior desgaste) essa hipótese é válida apenas para a usinagem do Bloco S (MQL), em todas as outras condições, os resultados apontaram maiores picos do que vales. Resultado semelhante também pode ser observado para as ferramentas com revestimento DLC, que apresentaram a segunda maior taxa de desgaste, no entanto ao analisar visualmente as imagens das superfícies obtidas pelo MEV (que serão apresentadas na seção 4.2.2 deste trabalho), percebe-se nitidamente que, as que foram usinadas com as ferramentas sem revestimento, possuem qualidade superficial melhor, com marcas de avanço bem definidas, sem interferências e sem sinais de raspamento de picos.

Ainda na Figura 4.19, ao analisar os resultados obtidos do parâmetro de achatamento  $R_{ku}$ , algumas ferramentas obtiveram resultado muito próximo a 3 (destacado no gráfico através de linha pontilhada em vermelho), sendo elas: DLC, Bloco S, seco (Fig. 4.19 (a)); Sem revestimento, Bloco S, MQL (Fig. 4.19 (b)); Sem revestimento e TiN, bloco C, seco (Fig. 4.19 (c)); Sem revestimento e DLC, bloco C, MQL (Fig. 4.19 (d)). Para todas essas pode-se concluir que o perfil de rugosidade apresenta um achatamento semelhante ao modelo normal. Por outro lado, foram observados valores de  $R_{ku}$  maiores que 3, em sua maioria, nos blocos S e C, na condição de usinagem a seco, o que indica um perfil com a presença de picos e/ou vales com formatos afunilados e agudos. Com destaque para os altos valores

de desvio padrão, exibidos por meio da barra de erros, o que reflete a baixa repetibilidade dos resultados obtidos, sendo observados (através do perfil de rugosidade traçado pelo perfilômetro) principalmente a ocorrência de grandes picos isolados.

Quando observados os resultados de Rku, para os blocos S e C, na condição de corte utilizando MQL (Fig. 4.19 (b) e (d)), percebe-se em sua grande maioria valores menores que 3, o que revela superfícies com a presença de picos e/ou vales mais arredondados, característicos de superfícies do tipo platô.

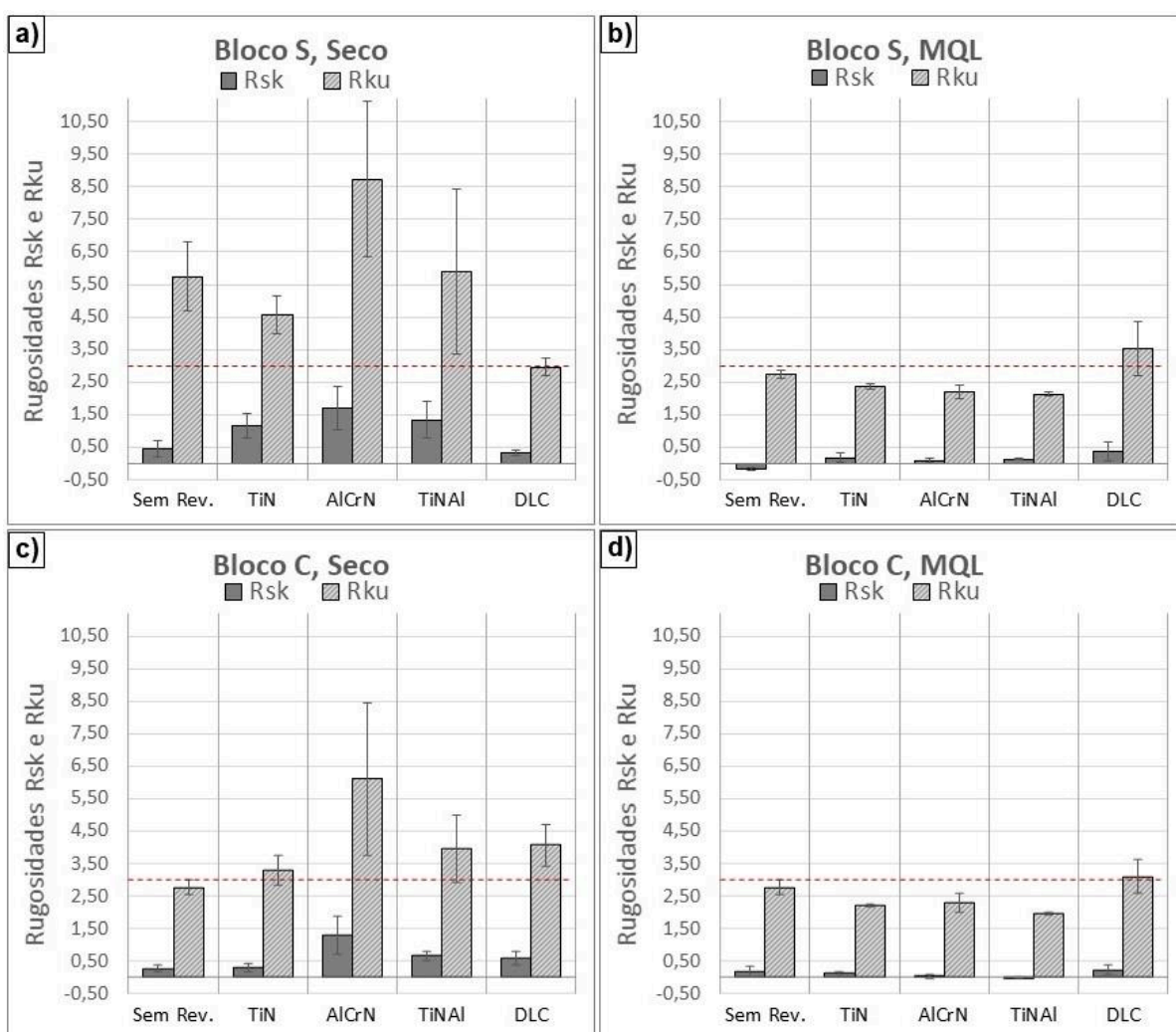


Figura 4.19 - Média das rugosidades Rsk e Rku, em (a) Bloco S, Seco; (b) Bloco S, MQL; (c) Bloco C, Seco; (d) Bloco C, MQL.

Resultados mais homogêneos de Rsk e Rku foram observados por De Assis et al. (2020) ao usar aço inoxidável 316L fabricado por PBF, variando velocidade de corte, avanço por dente e diâmetro das ferramentas sem revestimento. Em todas as condições testadas e medidas no centro dos canais, os autores observaram os valores de assimetria

(Rsk) próximos a zero, indicando simetria predominantemente com distribuição normal, sem superfícies com maior número de picos ou vales e Rku sempre abaixo de 3, indicando a presença de picos e/ou vales em sua maioria sempre arredondados.

De uma maneira geral, quando observados os resultados de rugosidade obtidos neste trabalho, não foi possível relacionar a influência da progressão do desgaste ao aumento das rugosidades, com conseqüente piora do acabamento superficial. Em relação aos tipos diferentes de ferramentas, tomando apenas os parâmetros de rugosidade de forma isolada, pode-se concluir que o melhor desempenho foi obtido através da usinagem utilizando ferramenta sem revestimento, no Bloco S, com aplicação de MQL e o pior desempenho pela ferramenta com revestimento TiN, na usinagem do Bloco S, na condição a seco.

#### 4.2.2. *Superfície Microusinada*

A qualidade superficial também foi analisada de forma qualitativa através das imagens das superfícies microusinadas, obtidas pelo MEV. Ressalta-se que todos os canais realizados foram observados integralmente a procura de características (similares ou diferentes) e quando necessário, alguns detalhes também foram analisados de forma quantitativa.

Em função do grande volume de imagens geradas ao longo de todo este trabalho, obtidas via MEV (cerca de 4 000 un.), nesta sessão são apresentadas primeiramente alguns exemplos dos diferentes tipos de superfícies microusinadas observadas. Estas serão classificadas e numeradas em função do tipo, para facilitar uma análise posterior, onde será indicado a ocorrência de cada uma delas ao longo dos canais e condições de corte.

A Figura 4.20 apresenta imagens de superfícies usinadas classificadas como Tipo 1, que tem como principal característica a obtenção de uma superfície suave, com menores deformações plásticas, sem interferências e poucos sinais de raspamento de picos. Observa-se de forma bem definida, praticamente apenas as marcas de avanço do ciclo ativo da ferramenta, típico do processo de microfresamento. É interessante observar uma periodicidade de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  nas marcas de avanço. Esta característica precisa ser investigada em detalhes em trabalhos futuros pois parece ser uma característica comum no microfresamento.

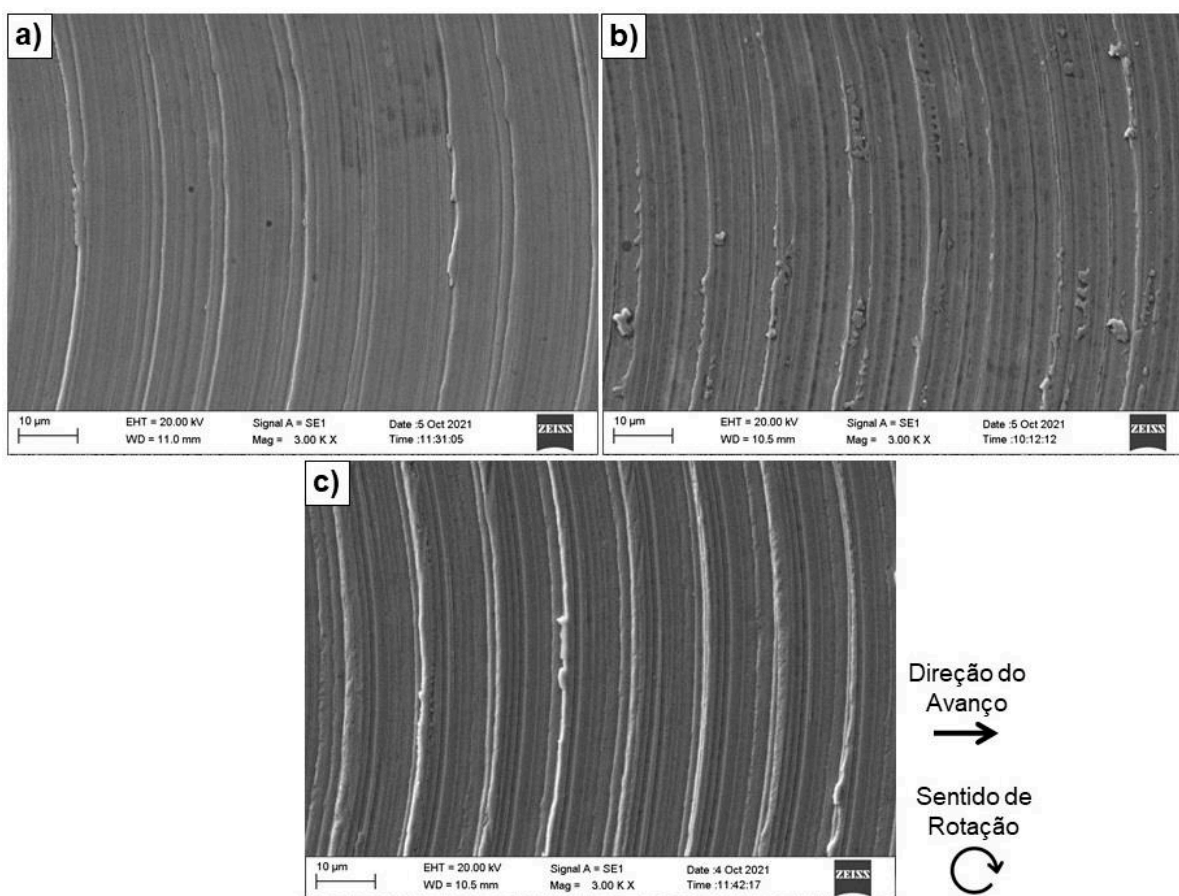


Figura 4.20 - Superfícies usinadas Tipo 1, em (a) Ferramenta sem revestimento, Bloco S, MQL; (b) Ferramenta sem revestimento, Bloco C, MQL; (c) Ferramenta com revestimento DLC, Bloco C, MQL.

A Figura 4.21 apresenta imagens de superfícies usinadas classificadas como Tipo 2, sendo estas o inverso das apresentadas como Tipo 1, onde através da análise qualitativa visual é possível observar uma integridade superficial pior, causada pelo mecanismo de sulcamento (*ploughing*) e por muito material aderido ao fundo do canal. As marcas de avanço do ciclo ativo da ferramenta ainda são visíveis, porém de forma mais discreta, em alguns pontos parece ter ocorrido o raspamento em função do desgaste da ferramenta ou estas estão encobertas pelas partículas aderidas na superfície da peça. Ressalta-se que, apesar da dificuldade já relatada de comprovação da formação de APC na microusinagem, o material observado no fundo do canal pode sugerir a formação desta, neste caso, desprendendo-se de forma contínua e regular, distribuída de maneira uniforme tanto no centro, quanto nas laterais dos canais. A maior incidência deste tipo de superfície foi principalmente para microusinagem utilizando ferramentas com revestimento DLC, seguidas (em menor volume) para as ferramentas com revestimento TiN e TiAlN, que reforça esta suposição, em função da presença de material aderido a ponta dessas ferramentas,

conforme relatado no item 4.1.2 deste trabalho. Novamente observa-se uma periodicidade de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  nas marcas de avanço.

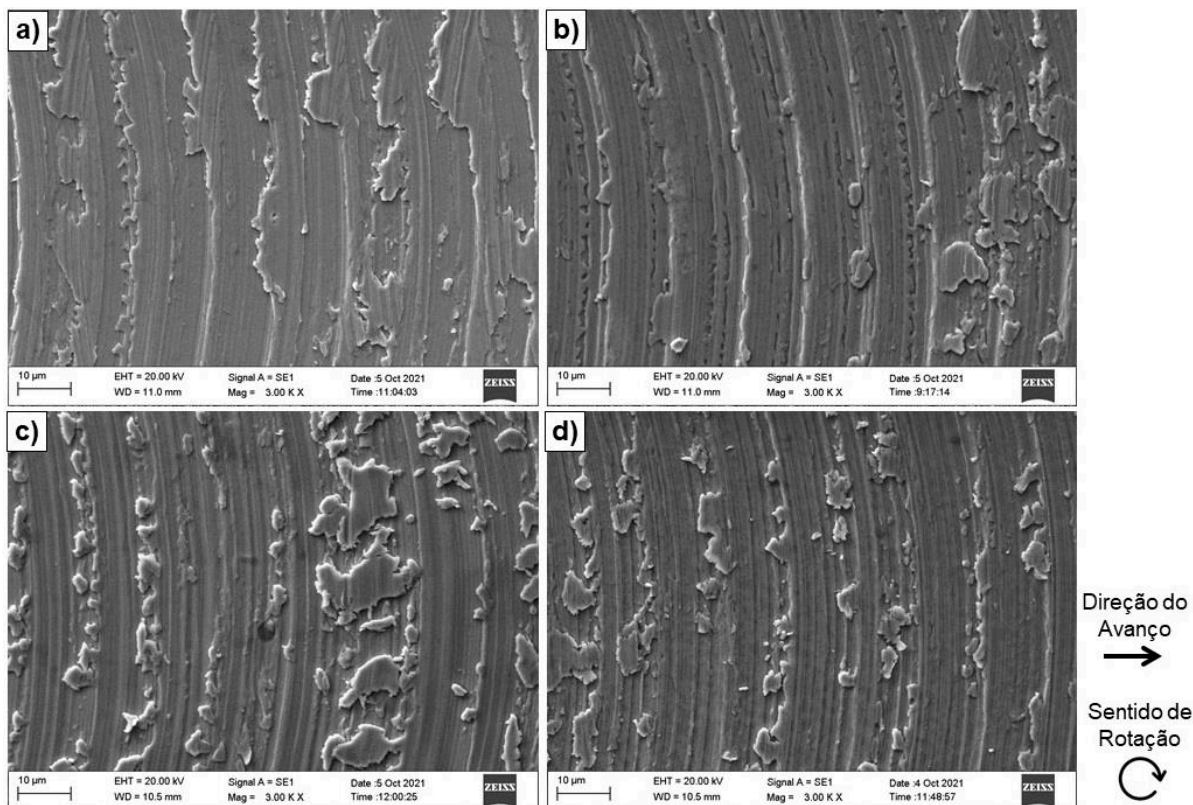


Figura 4.21 - Superfícies usinadas Tipo 2, utilizando ferramentas com revestimento DLC, em (a) Bloco S, seco; (b) Bloco C, seco; (c) Bloco S, MQL; Bloco C, MQL.

A Figura 4.22 mostra imagens de superfícies usinadas classificadas como Tipo 3. Estas são semelhantes ao já descrito para as superfícies classificadas como Tipo 2, porém a principal diferença é que as partículas aderidas no fundo do canal são maiores, distribuídas de forma irregular, com aparência de que ocorreu alisamento e/ou raspamento de picos (nos locais indicados pelas setas pretas). Estas partículas não apresentam uma tendência de aumento ou diminuição em pontos específicos do canal ou ao longo dele, sendo observadas em sua grande maioria nas superfícies obtidas no Bloco S, usinadas a seco. Sugerem também, indícios de que houve a formação de APC, no entanto maiores, com desprendimento irregular e esporádico.



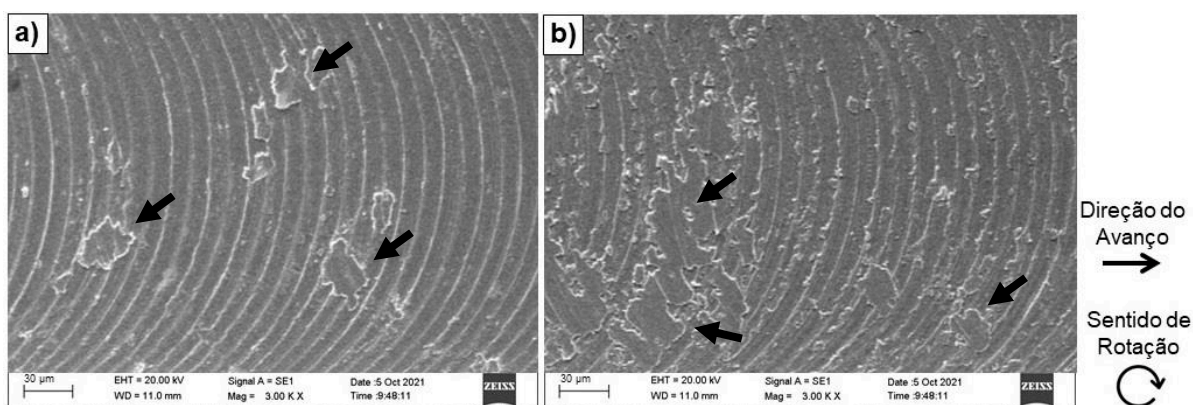


Figura 4.22 - Superfícies Tipo 3, usinadas no Bloco S na condição a seco, em (a) Ferramenta sem revestimento; (b) Ferramenta revestimento DLC.

Na Figura 4.23 é possível observar as imagens das superfícies usinadas classificadas como Tipo 4. Estas possuem as tradicionais marcas de avanço do ciclo ativo e também marcas em direção oposta ao avanço da ferramenta, que indicam que a aresta de corte, em seu período inativo, ficou em contato com a superfície da peça. Nas superfícies Fig. 4.23 (a) Bloco C, Ferramenta TiN, MQL; Fig. 4.23 (b) Bloco C, Ferramenta TiAl, MQL e Fig. 4.23 (c) Bloco S, Ferramenta TiAl (seco), as marcas de avanço do ciclo ativo são mais fortes que as marcas do período inativo, que parecem ter marcado a superfície apenas em pontos onde os picos eram mais altos, com destaque para a imagem (c) onde a extremidade de um pedaço de cavaco aderido ao fundo do canal foi marcado também pela fase inativa da ferramenta, conforme indicado na seta preta. Já na superfície mostrada na Fig. 4.23 (d) Bloco C, Ferramenta DLC (MQL), é possível observar marcas fortes da microferramenta na peça, praticamente com a mesma intensidade nos períodos ativos e inativos.

Ressalta-se que, as superfícies usinadas do Tipo 4, não foram predominantes em nenhum dos canais avaliados, o que descarta a possibilidade de algum desvio da máquina ferramenta utilizada, como por exemplo a inclinação do mandril em relação à mesa. Não foi possível identificar também, um padrão de surgimento, como por exemplo início, meio, fim dos canais, ou ainda, pequeno ou maior comprimento usinado. Observa-se sua ocorrência de forma totalmente aleatória, porém com um maior número de incidências em diferentes ferramentas ao usar o Bloco C, utilizando MQL.

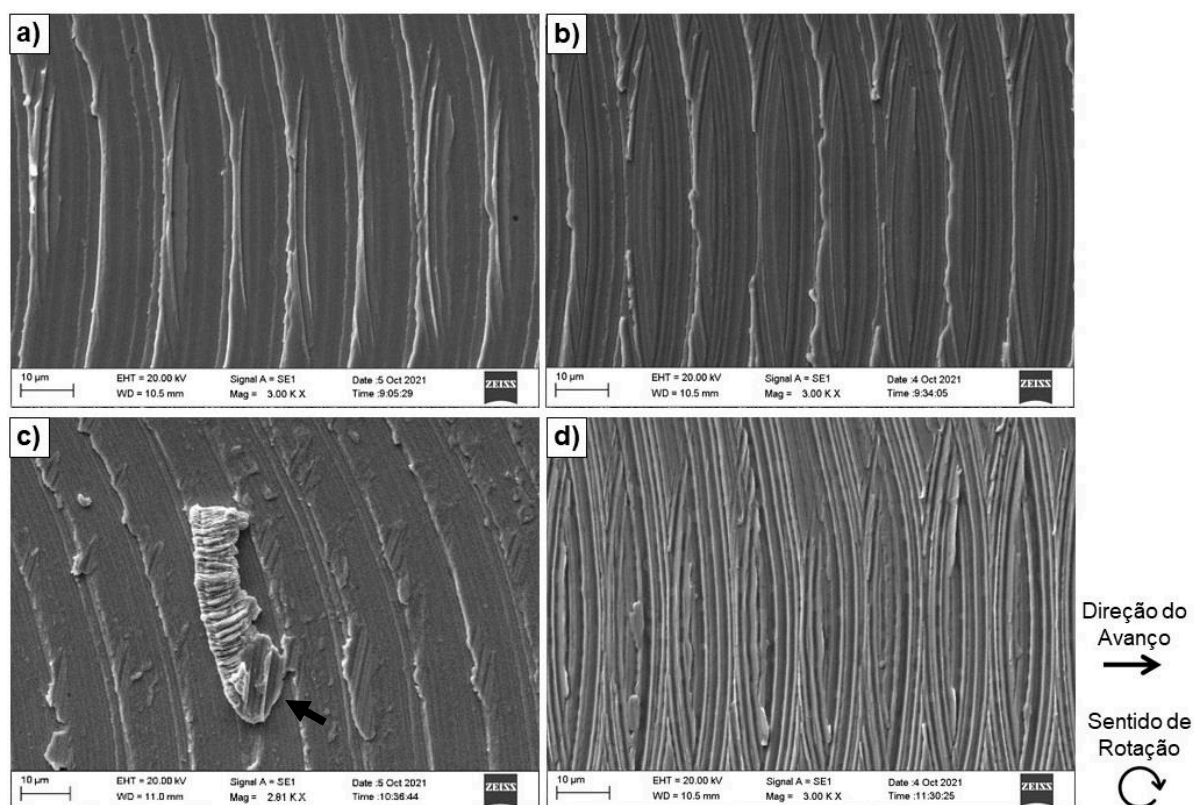


Figura 4.23 - Superfícies usinadas Tipo 4, em (a) Bloco C, Ferramenta TiN, MQL; (b) Bloco C, Ferramenta TiAl, MQL; (c) Bloco S, Ferramenta TiAl, seco; (d) Bloco C, Ferramenta DLC, MQL.

Outra variação de superfície usinada é apresentada na Fig. 4.24, classificada como Tipo 5. Esta foi observada apenas na microusinagem do Bloco C, com a ferramenta revestida com AlCrN, utilizando MQL. A superfície em questão chamou muita atenção, pela grande semelhança com o que foi descrito no estudo de Wang, et al. (2016), conforme imagem adaptada mostrada na Fig. 4.24 (a). Os autores realizaram o microfresamento de aço inoxidável 316L com ferramentas de metal duro, sem revestimento. Concluíram que a aresta redonda da ferramenta (própria das limitações do processo), promove um regime diferente e único de formação de cavacos e mecanismo de corte, em função do ângulo de saída negativo. Assim, o material da peça fica sujeito predominantemente ao sulcamento (*ploughing*) com algum cisalhamento, sendo favorável também à formação de APC. Como a dimensão da APC é da mesma ordem de grandeza da profundidade de corte e espessura do cavaco, mesmo com pouca quantidade de APC, o ângulo de saída e a geometria da ferramenta favorecem que os pequenos segmentos fraturados da APC, sejam varridos junto ao cavaco à medida que este flui pela ferramenta e/ou sejam aderidos à superfície da peça de trabalho (conforme indicado na Fig. 4.24 (a)), alterando assim a qualidade da superfície microusinada.

Na superfície observada na Fig. 4.24 (b) é possível identificar pequenas partículas de APC, conforme descrito por Wang, et al. (2016), aderidas à superfície usinada de forma contínua e ordenada, conforme indicado através das setas vermelhas.

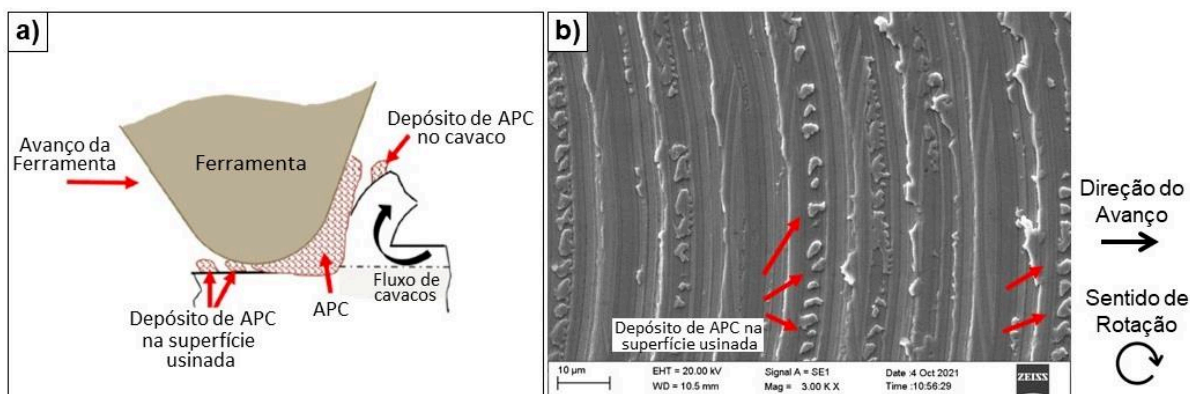


Figura 4.24 - Superfície usinada Tipo 5, em (a) ilustração explicativa do depósito de APC na superfície usinada (Adaptado de WANG, et al. 2016) e em (b) superfície do Bloco C, Ferramenta AlCrN, MQL.

Para facilitar a comparação e a indicação exata das condições em que ocorreram cada um dos diferentes tipos de superfície, é apresentado na Fig. 4.25 um resumo com as principais superfícies identificadas nos sete canais realizados, em cada uma das condições de corte. Para todas as condições em que foram assinaladas mais de uma opção, significa que estas foram observadas em comprimentos usinados diferentes dentro de um mesmo canal ou ainda ao longo de diferentes canais. É possível observar que a utilização de MQL, tanto no Bloco S, como no Bloco C, favoreceu a obtenção de uma melhor integridade superficial, sem indícios da formação de APC, em sua grande maioria predominando as superfícies usinadas do Tipo 1 (exceto pelas ferramentas com revestimento DLC). No entanto, não favoreceu diretamente a diminuição do desgaste, conforme detalhado no item 4.1.1 deste trabalho.

Ao contrário, a usinagem a seco proporcionou superfícies com pior integridade superficial, com indícios de formação de APC dentro das características descritas do Tipo 2 ou 3, exceto para a usinagem do Bloco C, com a ferramenta com revestimento AlCrN (predominantemente com superfícies do Tipo 1). Não foi identificado nenhuma tendência ou característica para as superfícies do Tipo 4, onde a ferramenta entrou em contato com a peça também em sua fase inativa, no entanto, nota-se que esta ocorreu em maior número e em diferentes ferramentas, na usinagem do Bloco C, utilizando MQL. E por fim, as pequenas partículas de APC do Tipo 5, observadas apenas na usinagem do Bloco C, com a ferramenta revestimento AlCrN, utilizando MQL.



			Superfícies Microusinadas - Tipo:				
			1	2	3	4	5
<b>Bloco S</b>	SECO	Sem Revestimento			x		
		DLC		x	x		
		AlCrN			x		
		TiN		x			
		TiAlN		x		x	
	MQL	Sem Revestimento	x				
		DLC		x			
		AlCrN	x			x	
		TiN	x				
		TiAlN	x				
<b>Bloco C</b>	SECO	Sem Revestimento	x		x		
		DLC		x			
		AlCrN	x				
		TiN	x	x			
		TiAlN		x			
	MQL	Sem Revestimento	x				
		DLC	x	x		x	
		AlCrN	x				x
		TiN	x			x	
		TiAlN	x			x	

**Legenda (Tipos):**

<b>1</b>	Marcas de avanço do ciclo ativo, menores deformações plásticas, sem sinais de raspamento de picos.
<b>2</b>	Integridade superficial pior, muito material aderido ao fundo do canal e indícios de APC.
<b>3</b>	Semelhante ao anterior, porém com partículas maiores aderidas no fundo do canal, distribuídas de forma irregular.
<b>4</b>	Marcas de fase inativa.
<b>5</b>	Partículas de APC menores e espalhadas de forma regular.

Figura 4.25 - Resumo das principais superfícies identificadas em cada condição de corte.

Ao comparar vários tipos de diferentes superfícies microusinadas, é possível observar que além das marcas de avanço, ocorreram também outras marcas mais proeminentes, semelhantes às de avanço, regulares ao longo de todo o comprimento usinado, com distâncias médias equivalentes. Na Fig. 4.26 são apresentadas imagens das superfícies microusinadas, em (a) Bloco S, sem revestimento, MQL; (b) Bloco C, revestimento DLC, MQL; (c) Bloco C, revestimento TiAlN, MQL e (d) Bloco S, revestimento DLC, seco. Em todas as imagens foram realizadas medições aleatórias, sendo a média das menores dimensões equivalentes a  $1,09 \pm 0,30 \mu\text{m}$  (no intervalo de confiança de 95,45 %), comprovando que realmente se trata das marcas de avanço, tendo em vista o valor parametrizado de  $1 \mu\text{m/dente}$ , para todos os ensaios.

Foi constatado ainda, que as marcas mais proeminentes estão espaçadas a uma distância média de  $12,47 \pm 2,15 \mu\text{m}$  (no intervalo de confiança de 95,45%). Por estas estarem presentes em todos os canais realizados neste estudo e também em outros ensaios realizados no mesmo laboratório (com diferentes materiais e microferramentas), utilizando a mesma máquina-ferramenta, deve-se investigar se estão sendo geradas em função da rigidez da máquina, que pode durante o processo levar ao fenômeno de vibrações auto induzidas (*chatter*). Segundo Siddhpuraa e Pauroballya (2012) essas vibrações estão presentes em quase todas as operações de corte e são descritas por Zhang (2015) como um fenômeno físico, naturalmente existente em todos os tipos de usinagem, incluindo a microusinagem. Sabe-se também, que os efeitos do *chatter* são ainda mais evidentes para operações em baixas velocidades de corte (WAN et al., 2016), como por exemplo 37,3 m/min utilizada neste trabalho. Ressalta-se que a comprovação do fenômeno, deve ser validada através de análises mais aprofundadas e é apresentada neste trabalho como uma sugestão para estudos futuros.

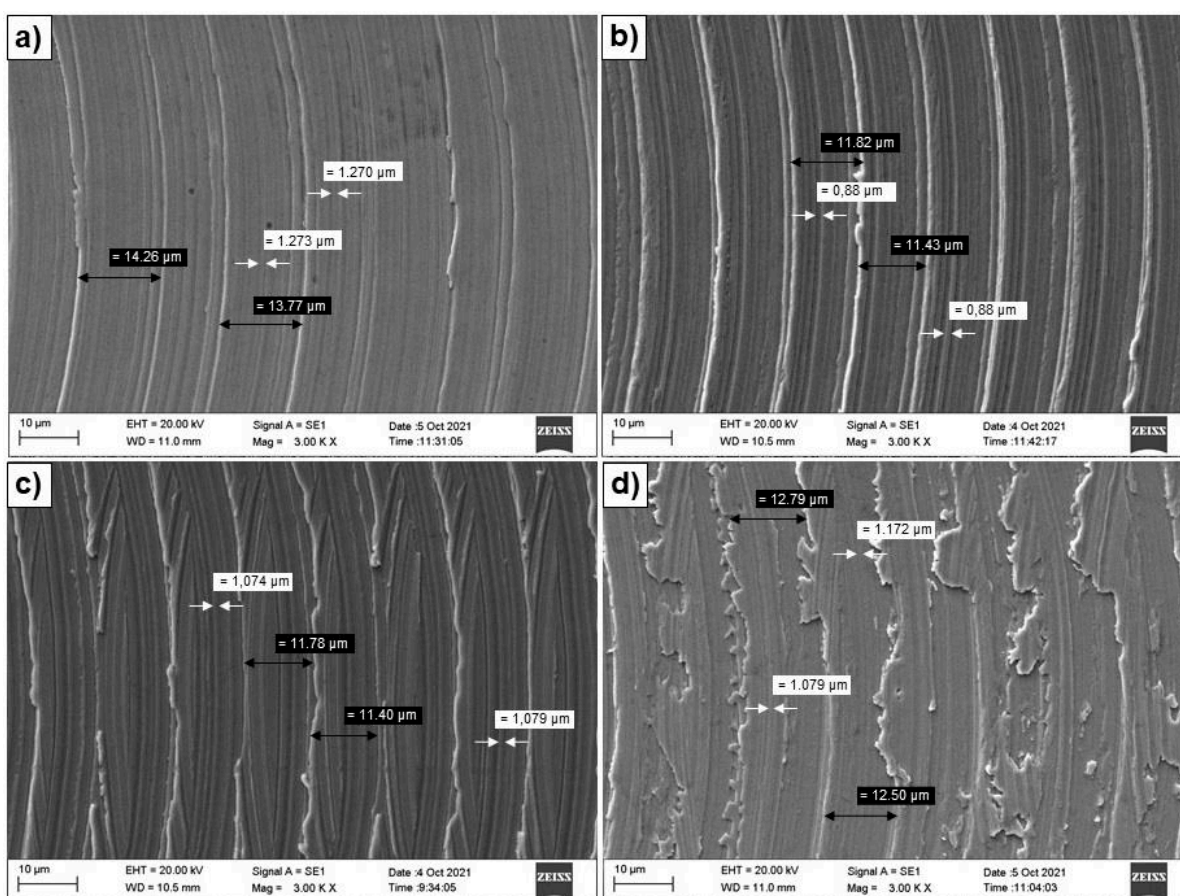


Figura 4.26 - Medição das marcas de avanço e possível fenômeno chatter, em (a) Bloco S, sem revestimento, MQL; (b) Bloco C, revestimento DLC, MQL; (c) Bloco C, revestimento TiNAl, MQL e (d) Bloco S, revestimento DLC, seco.

Conforme comentado ao longo do Capítulo II, os maiores desafios da MA estão ligados a eliminação de imperfeições características, que normalmente são induzidas pelo próprio processo, entre elas as porosidades na peça final. Estas são um grande problema, porque além comprometer a qualidade superficial ainda podem colocar em risco a confiabilidade do componente fabricado. Ao analisar as superfícies microusinadas dos canais realizados neste trabalho, são observadas várias porosidades que foram coincidentemente usinadas, em ambos os Blocos S e C. Na Fig. 4.27 (a) Bloco S, ferramenta sem revestimento (MQL), são identificados através das setas brancas, poros pequenos, com forma esférica, que segundo Bourell et al. (2017) ocorrem devido a gases aprisionados na região de fusão. Já no restante das imagens são identificados poros com formato irregulares, característicos de encolhimento ou contração devido à solidificação, em Fig. 4.27 (b) e (c) na usinagem do Bloco C, ferramenta TiAlN (MQL); (d) Bloco C, ferramenta TiN (MQL); (e) Bloco S, ferramenta DLC (seco), com destaque para a grande dimensão deste poro que no sentido longitudinal é superior a profundidade de corte utilizada nos experimentos realizados. Ressalta-se que nas superfícies usinadas, não foram observadas tendências quanto a localização dos poros nos blocos e nem em relação a maior e menor quantidade nos diferentes blocos.

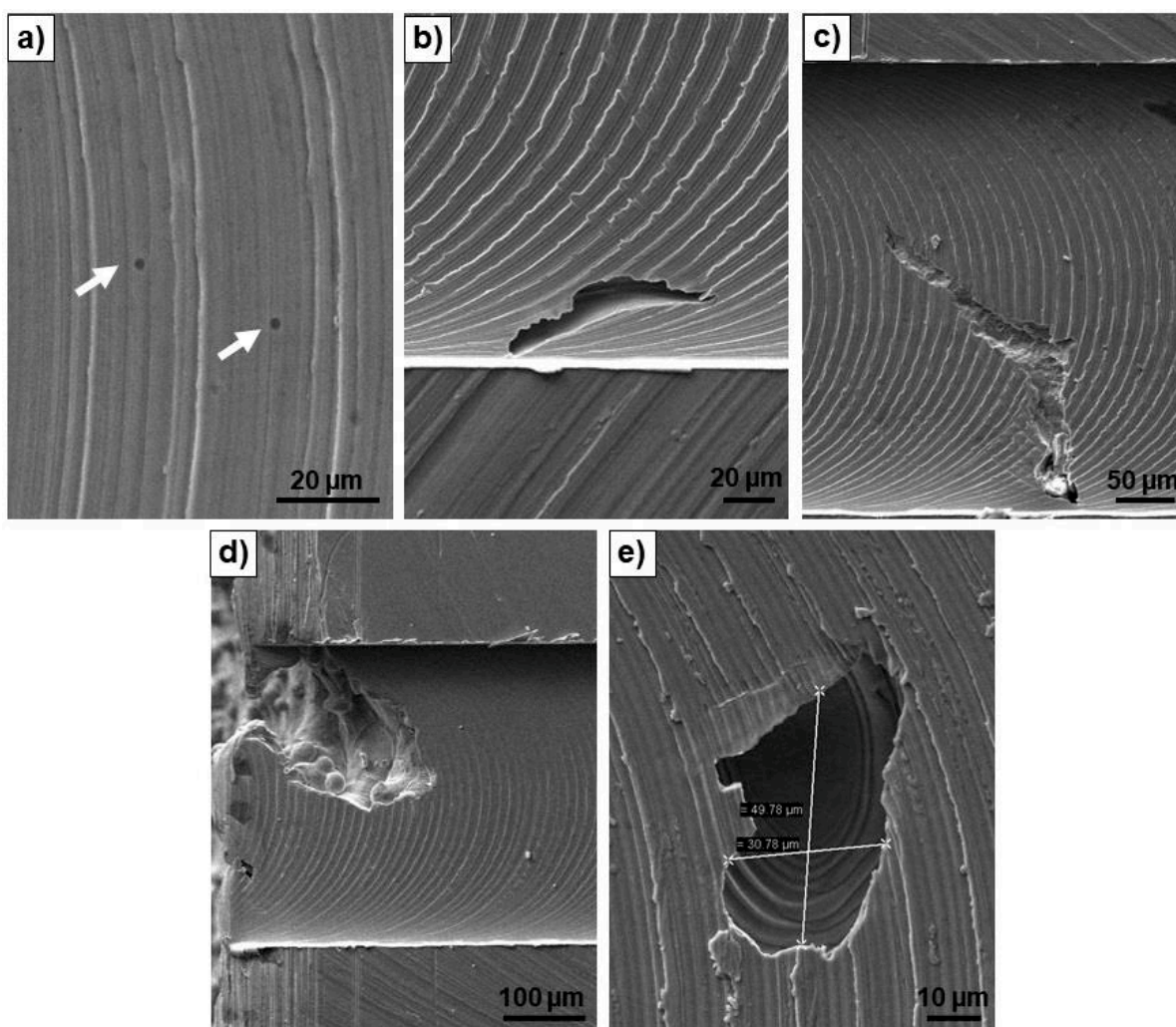


Figura 4.27 - Poros microusinados, em (a) Bloco S, ferramenta sem revestimento, MQL; (b) e (c) Bloco C, ferramenta TiAlN, MQL; (d) Bloco C, ferramenta TiN, MQL; (e) Bloco S, ferramenta DLC, seco.

Reforçando os indícios de que os poros comprometem a integridade superficial e a confiabilidade do componente microusinado, é mostrado na Fig. 4.28 a imagem de um poro localizado de forma centralizada no início do sexto canal realizado no Bloco C, ferramenta DLC, na condição a seco. Ao observar a ampliação da imagem, é possível notar a ocorrência de trincas em várias extremidades do mesmo, sendo um ponto de concentração de tensão crítico para aplicações que requerem esforços mecânicos. Além disso, é possível observar o perfil traçado com o uso do perfilometro, onde o poro tem um vale com dimensão extremamente superior às outras características da superfície do canal, comprometendo também a análise das rugosidades. Destaca-se ainda que não foi possível uma conclusão a respeito da formação das trincas, se estas se formaram junto com a porosidade ou se surgiram e se propagaram em função do microfresamento.



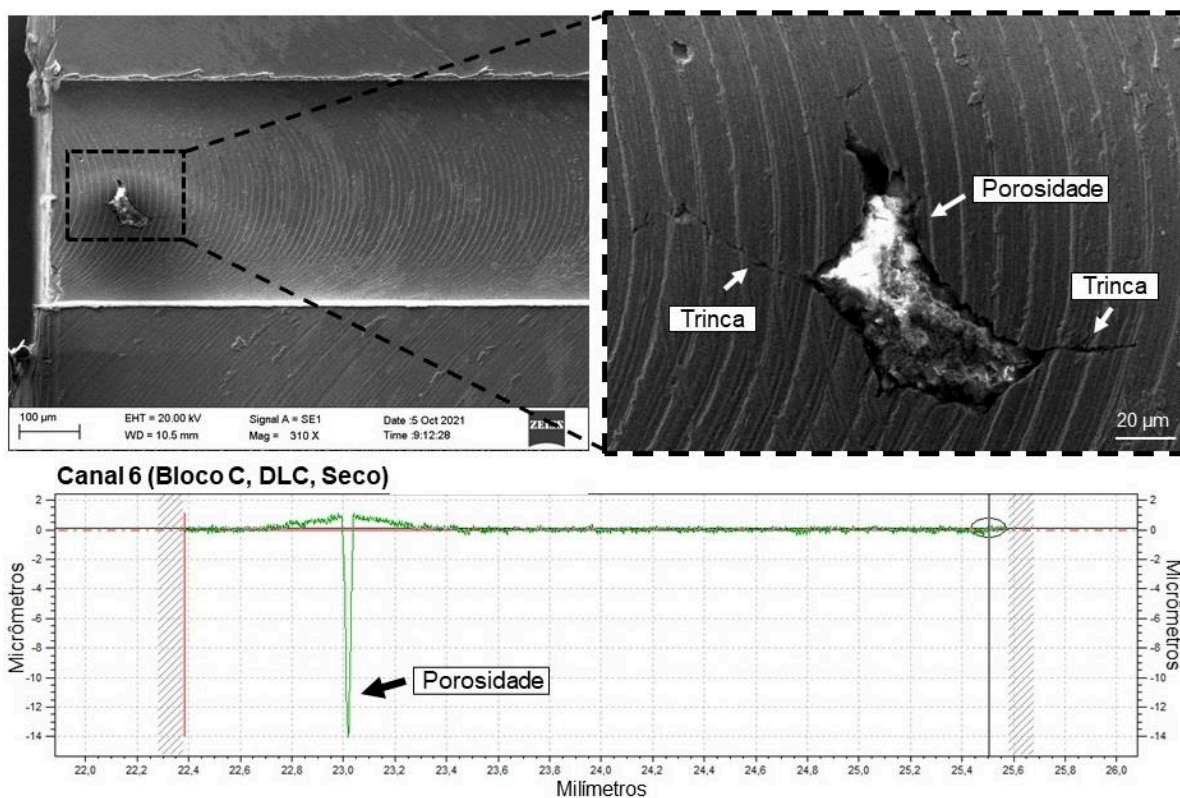


Figura 4.28 - Poro microusinado e perfil de rugosidade.

Outro detalhe observado em relação a superfície microusinada é que em muitos canais, foram identificadas regiões com cavidades internas concentradas nas extremidades das peças (início ou fim dos canais), o que compromete muito a qualidade superficial. Vários autores relataram em seus trabalhos, diferentes tipos de imperfeições características da MA, entre elas, baixa precisão dimensional, partículas fracamente fundidas e contrações irregulares do material devido à solidificação, com maior tendência a ocorrerem nas extremidades das peças (OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015; KURZYNOWSKI et al., 2018; SADIQ, et al. 2018).

Para os blocos estudados neste trabalho, acredita-se que eles possuíam essas cavidades internas, devido a contração do material no momento da solidificação e ainda partículas de pó parcialmente fundidas, que foram expostas juntamente com a cavidade. Ressalta-se que, essas cavidades nem sempre estavam próximas da extremidade vertical superior dos blocos, visto que, devido a pequena dimensão dos mesmos, foram necessárias diversas preparações para que fossem realizados os pré-testes e também os experimentos mencionados neste trabalho. Como exemplo, é mostrado uma cavidade na Fig. 4.29, onde anteriormente às imagens, o Bloco S foi preparado até a completa eliminação da superfície rugosa característica dos metais fabricados por MA e a obtenção de planicidade adequada aos experimentos. Logo em seguida foram realizados canais com profundidade de 40 μm

na fase de pré-testes, que posteriormente foram eliminados e a superfície preparada para uma nova rodada de experimentos. Na Fig. 4.29 (a) pode ser observada esta nova superfície preparada e os canais realizados. Do lado inferior direito é identificada (seta vermelha) uma região com a presença de cavidade. Na Fig. 4.29 (b) são mostradas imagens da preparação posterior do Bloco, onde os canais realizados anteriormente tinham sido usinados, para que fossem possíveis novos experimentos. No total foi usinada uma espessura de aproximadamente 170  $\mu\text{m}$  do topo do bloco original até o ponto registrado nas imagens da Fig. 4.29 (b), onde nota-se que a deformidade identificada anteriormente parece maior e também o surgimento de novas cavidades não identificadas na preparação anterior, destacadas através das setas pretas, em comparação com as imagens anteriores (regiões tracejadas).

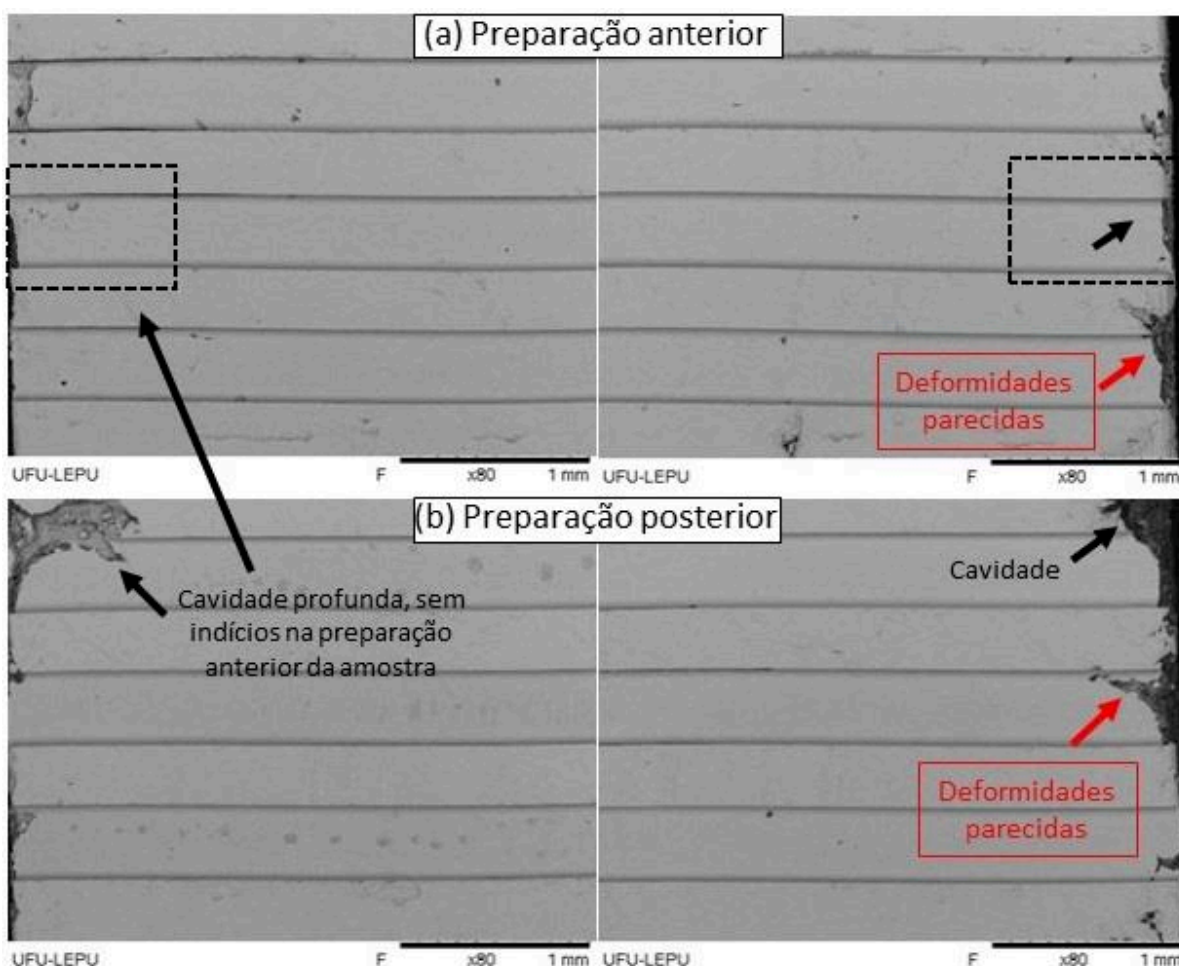


Figura 4.29 - Cavidades internas na superfície microusinada.

Na Figura 4.30 é mostrada a ampliação da imagem da cavidade profunda, identificada na Fig. 4.29. Através de medição, foi possível constatar que a mesma possui

um comprimento (da extremidade da peça até o fim da cavidade) de 718,4  $\mu\text{m}$ , quase o dobro da largura do canal usinado.

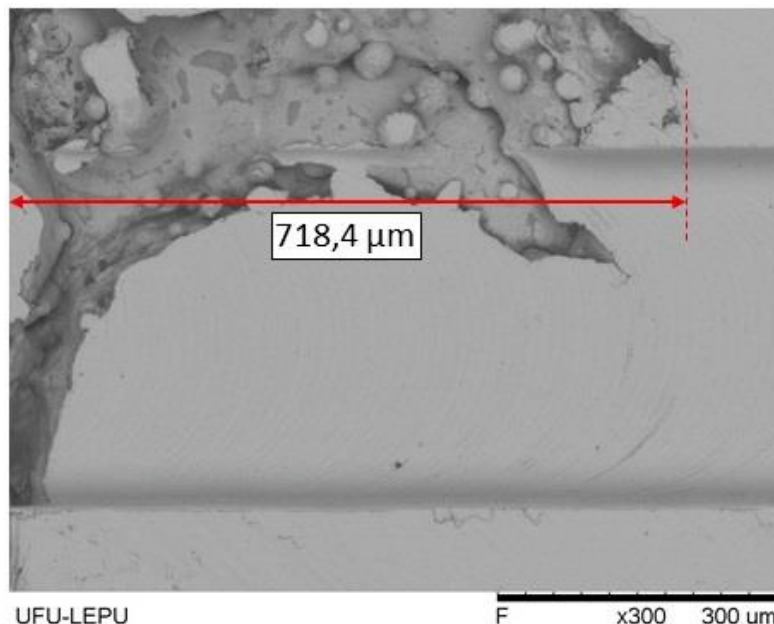


Figura 4.30 - Grande cavidade interna localizada na lateral do canal.

Na Figura 4.31 são mostradas outras imagens de canais que foram realizados sobre cavidades internas localizadas nas extremidades das peças. Em Fig. 4.31 (a) um exemplo de canal onde não foi encontrado o defeito mencionado (utilizado apenas para fins de comparação). Nas demais imagens é mostrada a ocorrência das cavidades no início dos canais, realizados no Bloco C com MQL, em Fig. 4.31 (b) é observado o canal usinado com a ferramenta revestida com TiAlN e em sua ampliação, parte da região com esse defeito interno, onde é possível observar claramente diversas partículas de pó parcialmente fundidas, identificadas pelas setas vermelhas. Na Fig. 4.31 (c) canal usinado com a ferramenta com revestimento DLC; 4.31 (d) canal usinado com a ferramenta revestimento AlCrN e por fim, Fig. 4.31 (e) canal usinado com a ferramenta revestimento TiN.



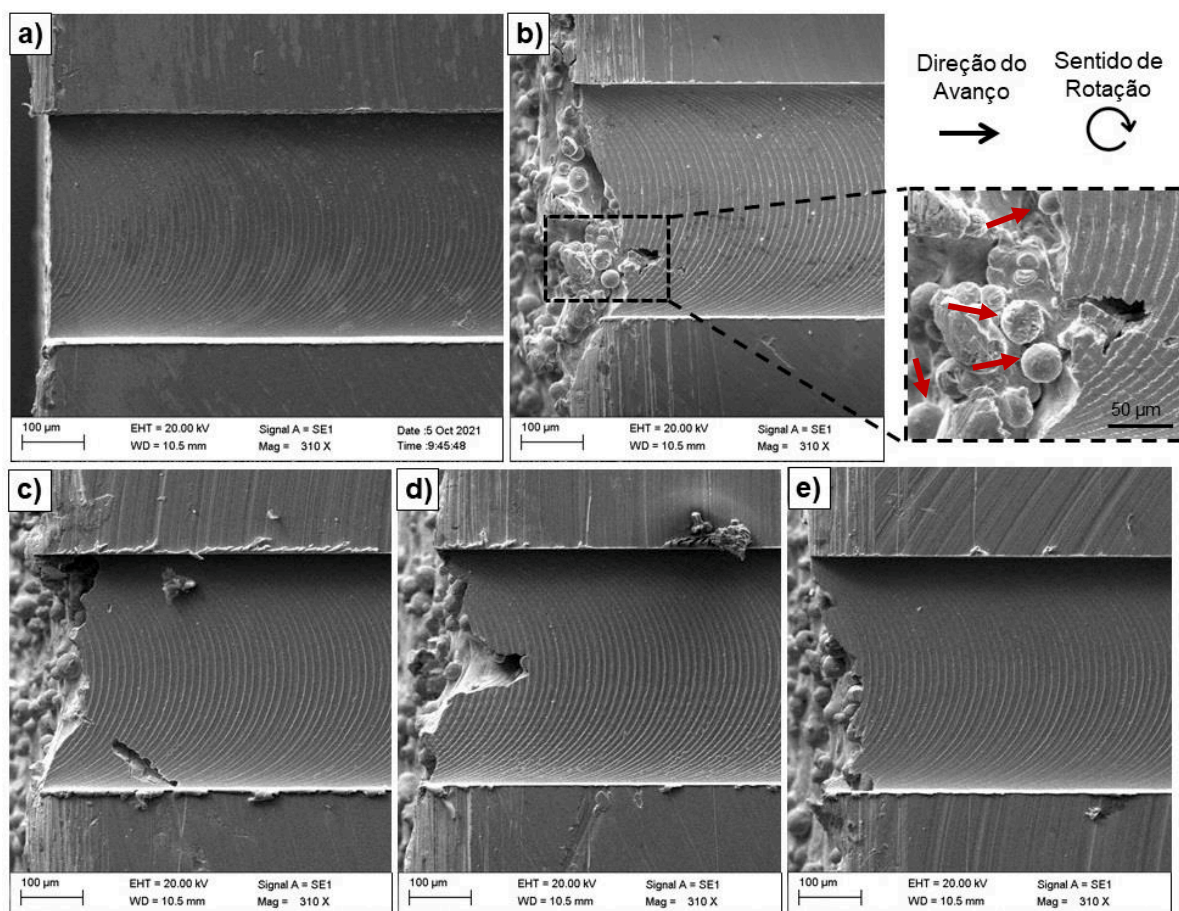


Figura 4.31 - Defeitos internos concentrados nas extremidades dos canais realizados no Bloco C, em (a) canal íntegro; (b) ferramenta TiAlN e partículas de pó parcialmente fundidas; (c) ferramenta DLC; (d) a ferramenta AlCrN; (e) ferramenta TiN.

Na Figura 4.32 são apresentadas imagens onde essas cavidades foram observadas predominantemente no fim dos canais realizados no Bloco S, em Fig. 4.32 (a) canal íntegro (utilizado para comparação); Fig. 4.32 (b) canal usinado com a ferramenta revestimento DLC; 4.32 (c) canal usinado com a ferramenta revestimento AlCrN e por fim, Fig. 4.32 (d) canal usinado com a ferramenta revestimento TiAlN.

Ainda sobre o fenômeno, constatou-se que, no Bloco C predominou a ocorrência no início dos canais e no Bloco S no final dos canais. Para quase todos os casos, a ocorrência foi observada de forma mais intensa em apenas um dos lados. Acredita-se que a formação das cavidades devido a contração do material no momento da solidificação e a presença de partículas de pó fracamente fundidas possa estar relacionada a estratégia de varredura do *laser*, sendo mais propensas a ocorrer de um lado ou de outro, do material (início ou fim) ou ainda possa ser independente da estratégia de varredura, porém relacionada a direção de impressão (começo ou fim da mesma), visto que, para este trabalho não foi possível a

identificação deste detalhe nas peças e as posições mencionadas (início e fim do canal) são apenas uma analogia em relação a direção de avanço adotada.

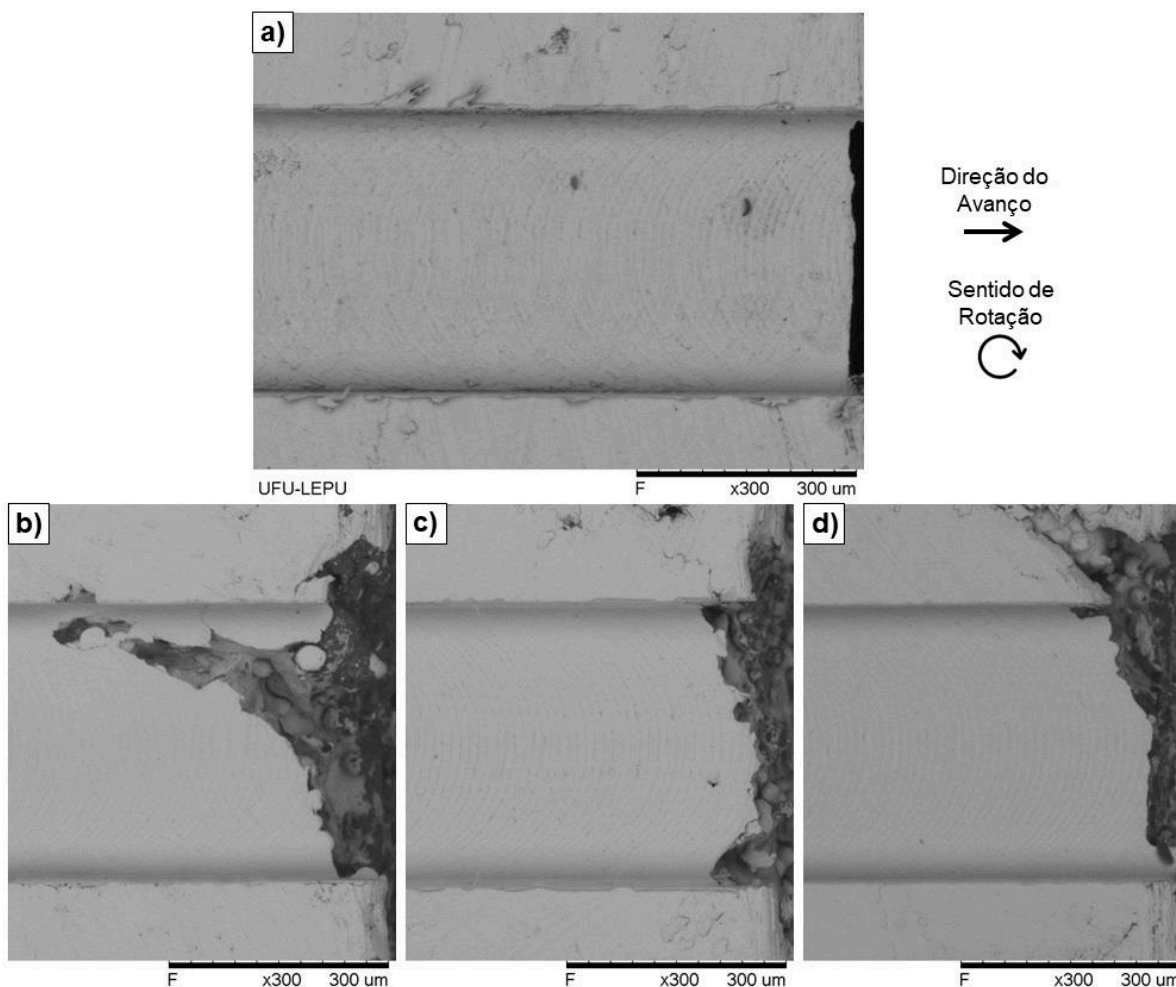


Figura 4.32 - Defeitos internos concentrados nas extremidades dos canais realizados no Bloco S, em (a) canal íntegro; (b) ferramenta DLC; (c) ferramenta AlCrN e (d) ferramenta TiAlN.

Conclui-se também que, dentro das etapas de pós-processamento dos materiais fabricados por SLM, para a realização de microcanais sem defeitos, é necessária uma preparação com remoção de material em todas as faces do bloco 3D fabricado, incluindo as laterais do mesmo. Resalta-se também que, conforme observado através do comprimento da cavidade, em alguns casos será necessário a remoção de uma quantidade significativa de material, quando comparada as dimensões envolvidas no processo de microssinagem.

### 4.3. Formação de Rebarbas

Neste tópico serão apresentados os resultados qualitativos e quantitativos relativos às rebarbas. Primeiramente, a formação de rebarbas foi avaliada de forma qualitativa, tomando como base a classificação típica feita por Lee e Dornfeld (2002) que consideram oito categorias diferentes de localização de rebarbas presentes em um canal fresado.

Ao analisar as entradas e saídas dos canais, exceto onde existiam cavidades internas localizadas nas extremidades (conforme ilustrado nas Fig. 4.31 e 4.32 deste trabalho), pode-se afirmar que em todos os ensaios, as rebarbas de entrada, entrada lateral (concordante e discordante), saída e saída lateral (concordante e discordante), praticamente não se formaram ou ocorreram de forma mínima. Na Fig. 4.33 podem ser observadas algumas imagens de canais realizados com as ferramentas sem revestimento, revestimento DLC e TiAlN, escolhidas para exemplificar o padrão comum obtidos nos ensaios.

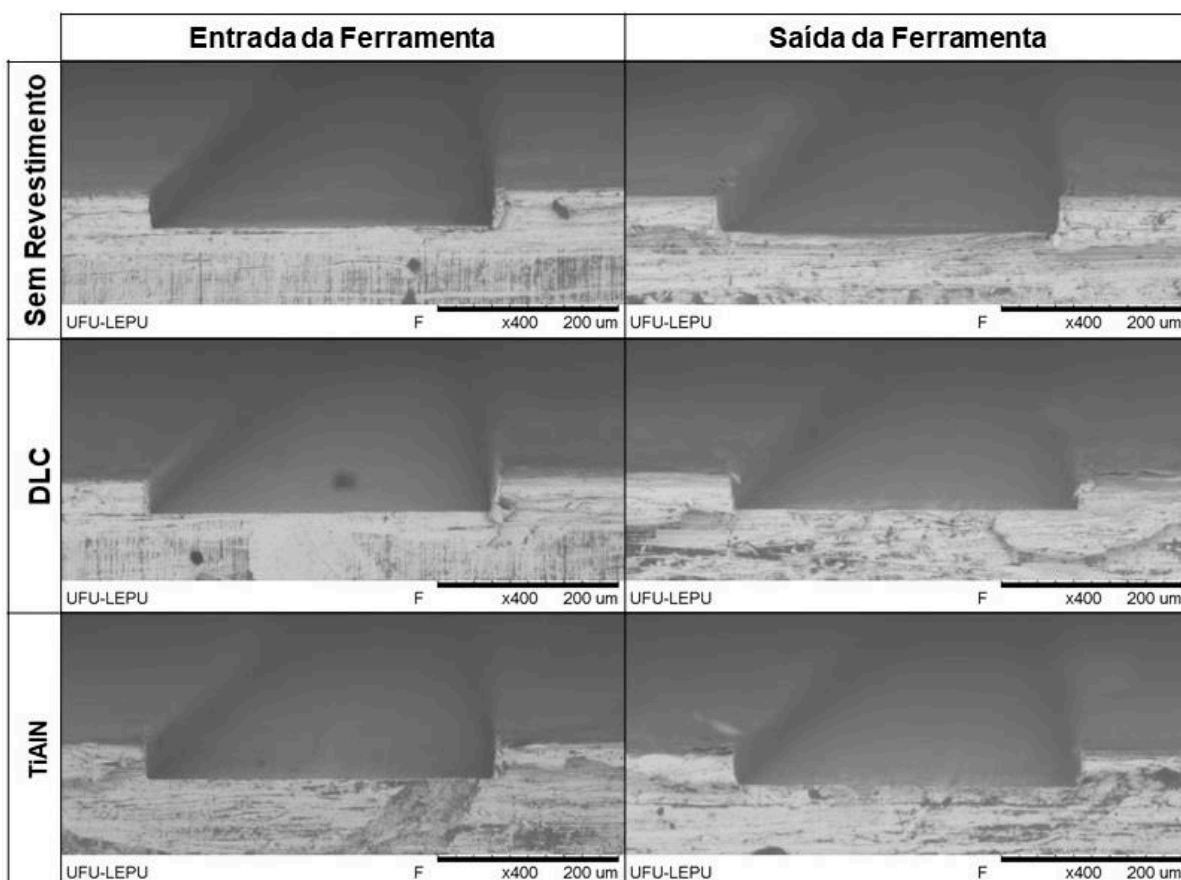


Figura 4.33 - Exemplos da formação de rebarbas na entrada e saída das ferramentas nos canais.

A maior incidência, volume e tamanho de rebarbas formadas, ocorreram no topo dos canais microfresados, tanto do lado discordante, quanto do lado concordante, e, portanto, serão o foco das análises. Porém, ressalta-se que o volume de rebarba obtido foi muito menor, quando comparado a outros trabalhos de microusinagem (DE OLIVEIRA CAMPOS et al. 2020; DE ASSIS et al. 2020; GOMES, DA SILVA e DUARTE; 2020; DE OLIVEIRA, GOMES e DA SILVA, 2020). Foi observado também, em todos os canais realizados, que a formação das rebarbas não segue um padrão contínuo ao longo do canal, podendo um mesmo canal ter rebarbas maiores em um ponto específico e menores em outros, não necessariamente sendo início e fim do mesmo.

Outro detalhe a ser observado é que não houve influência dos parâmetros: tipo de bloco, utilização ou não de MQL e desgaste da ferramenta, na formação de rebarbas (em maior ou menor volume) e nem nos tipos de rebarbas identificadas. Os diferentes padrões de formação, parecem estar mais vinculados ao tipo de ferramenta utilizado (com algumas exceções) e serão apresentados de forma resumida nas figuras a seguir (um exemplo de cada tipo de revestimento). As demais imagens das superfícies microusinadas serão omitidas, em função do grande volume de imagens obtidas.

Na Figura 4.34 são apresentadas imagens centrais dos sete canais realizados com a ferramenta sem revestimento, Bloco C, a seco. Em geral as ferramentas sem revestimento, propiciaram canais microusinados com rebarbas muito pequenas, em alguns casos praticamente inexistentes. O fundo dos canais, alternaram entre as superfícies usinadas classificadas como Tipo 1 ou Tipo 3.

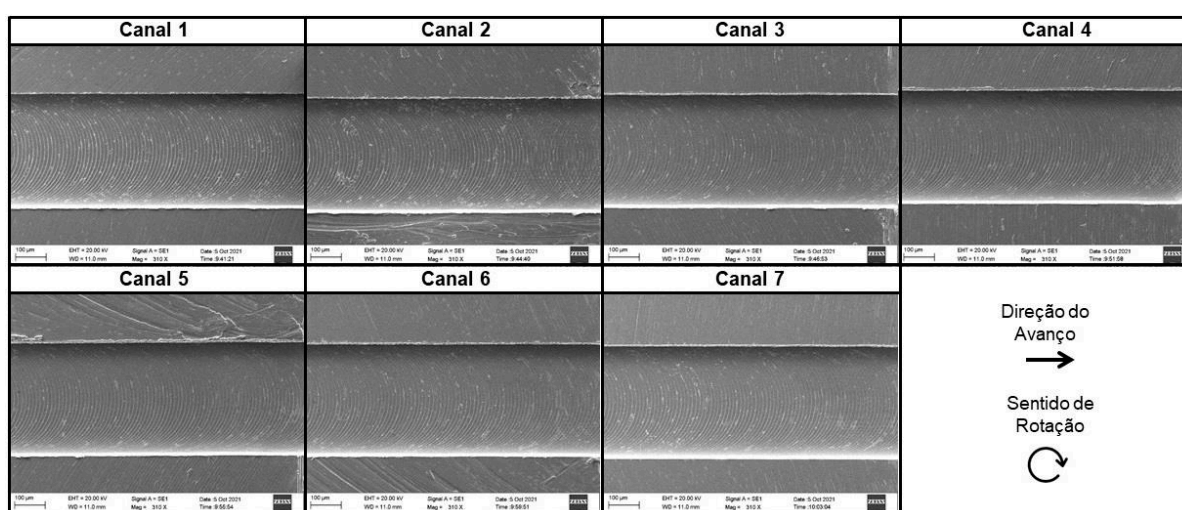


Figura 4.34 Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta sem revestimento, Bloco C, a seco.



Uma exceção para as ferramentas sem revestimento, foram os canais obtidos na microusinagem do Bloco S, com MQL, conforme Fig. 4.35. Apesar da superfície mais suave obtida no fundo do canal, característica do Tipo 1 e favorecida através da utilização de MQL, são percebidas rebarbas maiores distribuídas em alguns canais, com destaque para a grande rebarba do tipo pena, formada no início do canal 7, do lado discordante.

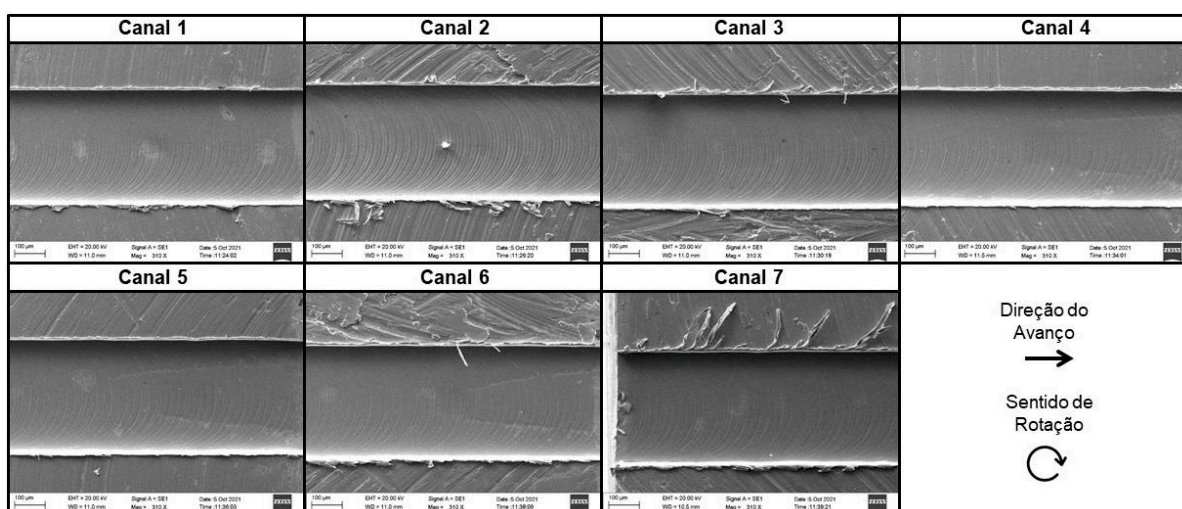


Figura 4.35 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta sem revestimento, Bloco S, MQL.

Na Figura 4.36 são apresentadas imagens centrais dos sete canais realizados com a ferramenta com revestimento DLC, Bloco S, a seco. Em geral, os canais apresentaram o mesmo padrão, com rebarbas em sua grande maioria baixas (de ambos os lados) e em alguns pontos isolados algumas maiores, predominantemente do tipo pena no lado discordante, como observado no canal 1.

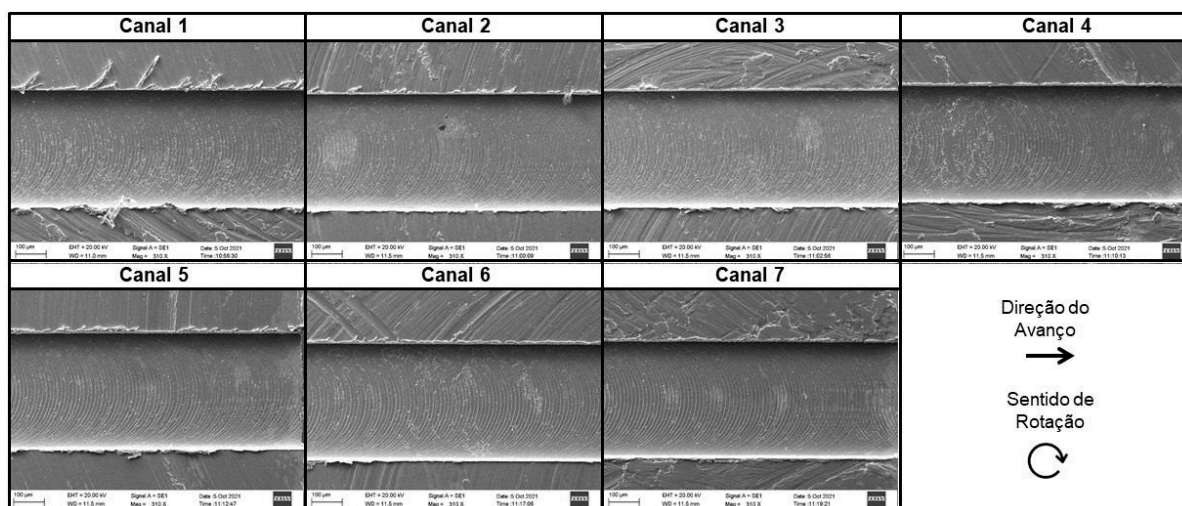


Figura 4.36 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta revestimento DLC, Bloco S, a seco.

Na Figura 4.37 podem ser observadas as imagens centrais dos sete canais realizados com a ferramenta com revestimento AlCrN, Bloco C, MQL. Os canais, em sua grande maioria, apresentam rebarbas extremamente baixas de ambos os lados (como observado nos canais 2, 3 e 6). No entanto, foram identificados pontos com rebarbas maiores do tipo agulha e/ou rebarbas do tipo pena invertida (quando a rebarba se forma para dentro do canal), predominantemente do lado discordante, como observado de forma discreta no canal 4 e mais proeminente no canal 5. Ressalta-se que os tipos de rebarbas, em especial a rebarba invertida, observada nesses canais, serão explicadas e detalhadas um pouco mais adiante neste trabalho.

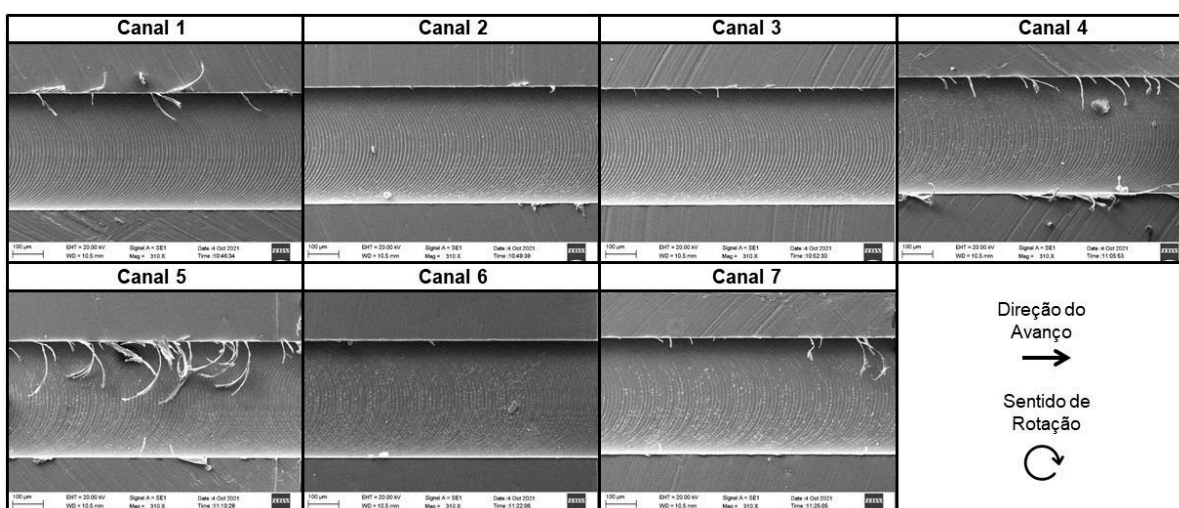


Figura 4.37 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta revestimento AlCrN, Bloco C, MQL.

Na Figura 4.38 são apresentadas imagens centrais dos sete canais realizados com a ferramenta revestimento TiN, Bloco C, MQL. Em geral, os canais apresentam padrões semelhantes entre si, com rebarbas baixas em boa parte dos canais, porém alguns pontos com rebarbas maiores (principalmente do lado discordante) e normalmente do tipo pena ou agulha. Como exceção, os canais usinados no Bloco S, sem a utilização de fluido, tiveram rebarbas semelhantes às já descritas, porém em maior volume ao longo de todos os canais.

No geral, nos ensaios realizados com ferramentas com revestimento TiN, foram observadas também, rebarbas invertidas dos lados concordante e discordante, porém em menor volume que os observados quando utilizado a ferramenta com revestimento AlCrN.

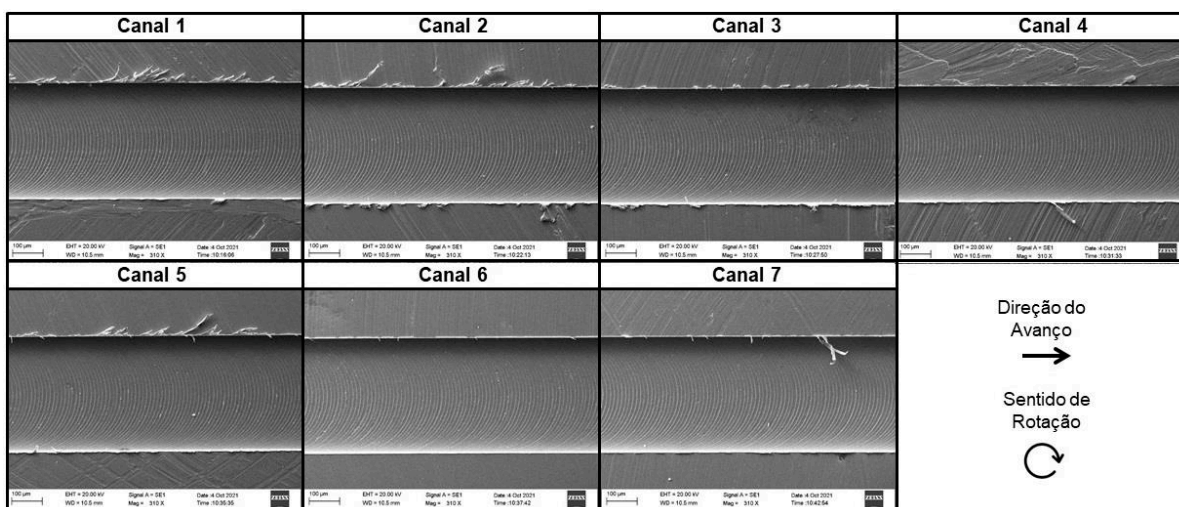


Figura 4.38 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta revestimento TiN, Bloco C, MQL.

Na Figura 4.39 é possível observar as imagens centrais dos sete canais realizados com a ferramenta revestimento TiAl, Bloco S, a seco. As rebarbas obtidas foram muito semelhantes ao já relatado para as ferramentas DLC e TiN (baixas no geral, com pontos específicos de maior ocorrência e maiores do lado discordante). Como exceção, ao usar o Bloco C com MQL, em todos os canais, praticamente não houve a formação de rebarbas ou ocorreu de forma mínima, ao contrário deste, ao usar também o Bloco C, porém a seco, observou-se um volume muito maior de rebarbas, principalmente do tipo pena, do lado discordante, em quase todos os canais.

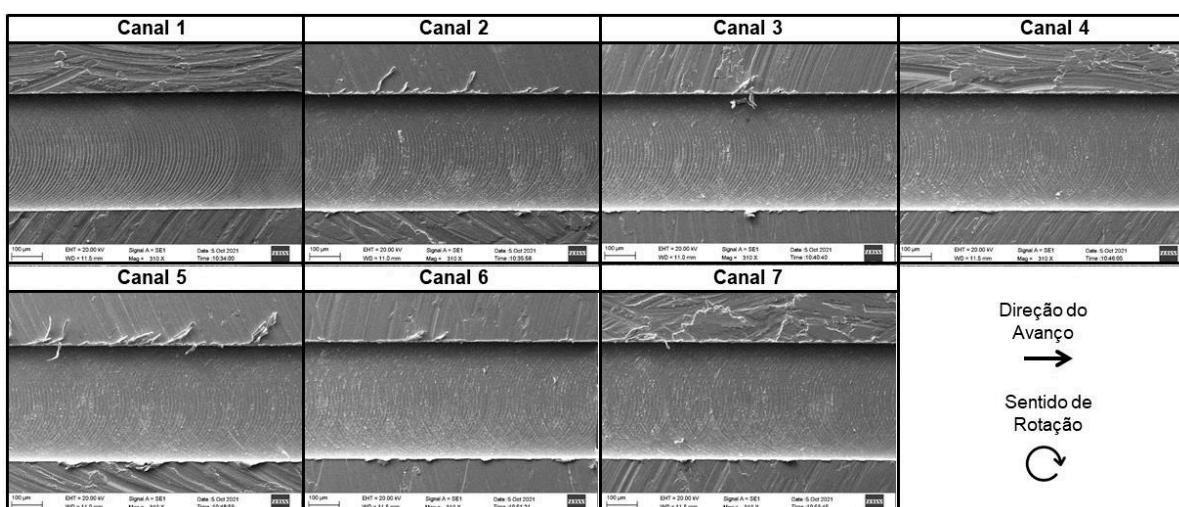


Figura 4.39 - Rebarbas geradas na microusinagem, utilizando ferramenta revestimento TiAl, Bloco S, Seco.



As rebarbas de topo foram identificadas e classificadas, de acordo com os tipos e formas propostos por Chern et al. (2007) para o microfresamento. Na Fig. 4.40 é possível observar exemplos de rebarbas semelhantes às rebarbas do tipo primária, com a identificação do tipo de ferramenta utilizado, bloco e utilização ou não de fluido de corte. Para Chern et al. (2007) este tipo de rebarba é formado quando a ferramenta não forma cavaco e o atrito se torna predominante, pressionando e deformando plasticamente o material à frente da ferramenta, que se fratura próximo ao meio, gerando rebarbas com a largura aproximada da metade do diâmetro da ferramenta. Para os exemplos observados neste trabalho, acredita-se que o início da formação seja de forma semelhante, porém a fratura ocorra de forma mais constante, gerando rebarbas menores, com larguras inferiores à proposta por estes autores.

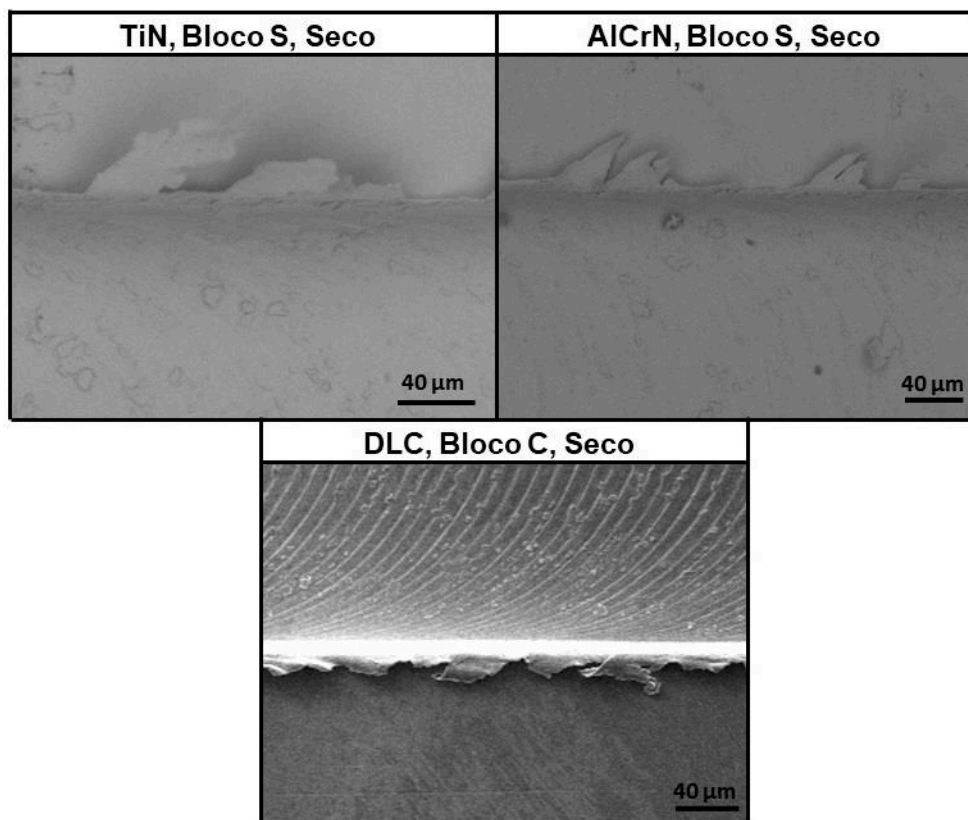


Figura 4.40 - Rebarbas semelhantes as rebarbas do tipo primária.

Na Fig. 4.41 são apresentados exemplos de rebarbas do tipo pena, com as respectivas identificações do tipo de ferramenta utilizado, bloco e utilização ou não de fluido de corte. Esse tipo de rebarba é uma variação da rebarba do tipo primária, em que ocorreu a fratura da mesma, durante o processo de microusinagem.

Foi observado ainda que, todas as rebarbas do tipo pena foram formadas do lado discordante, sendo este resultado semelhante ao obtido por Chern et al. (2007) que afirmaram que as rebarbas formadas deste lado tendem a permanecer presas na borda dos canais, enquanto no lado oposto, onde o fresamento é concordante, as rebarbas tendem a ser removidas com a formação de cavacos e, portanto, poucas rebarbas podem ser encontradas. No entanto, resultados opostos, onde as rebarbas encontradas no lado concordante são maiores do que as rebarbas do lado discordante, também são encontrados com frequência na literatura, como por exemplo Gomes, Da Silva e Duarte (2020) na microusinagem do mesmo material, ou utilizando materiais e condições de corte diferentes, como por exemplo: Kiswanto, Zariatn e Ko (2014); Kou et al. (2015); Wu, Li e He (2017); Wang, Zou e Huang (2019); Silva e Da Silva (2019). Portanto, pode-se concluir que a formação de rebarbas é um processo complexo e dependente das condições de corte, parâmetros de entrada e condições da máquina ferramenta, sendo necessário sempre uma análise individual dos fatores que mais contribuíram para sua formação e posicionamento.

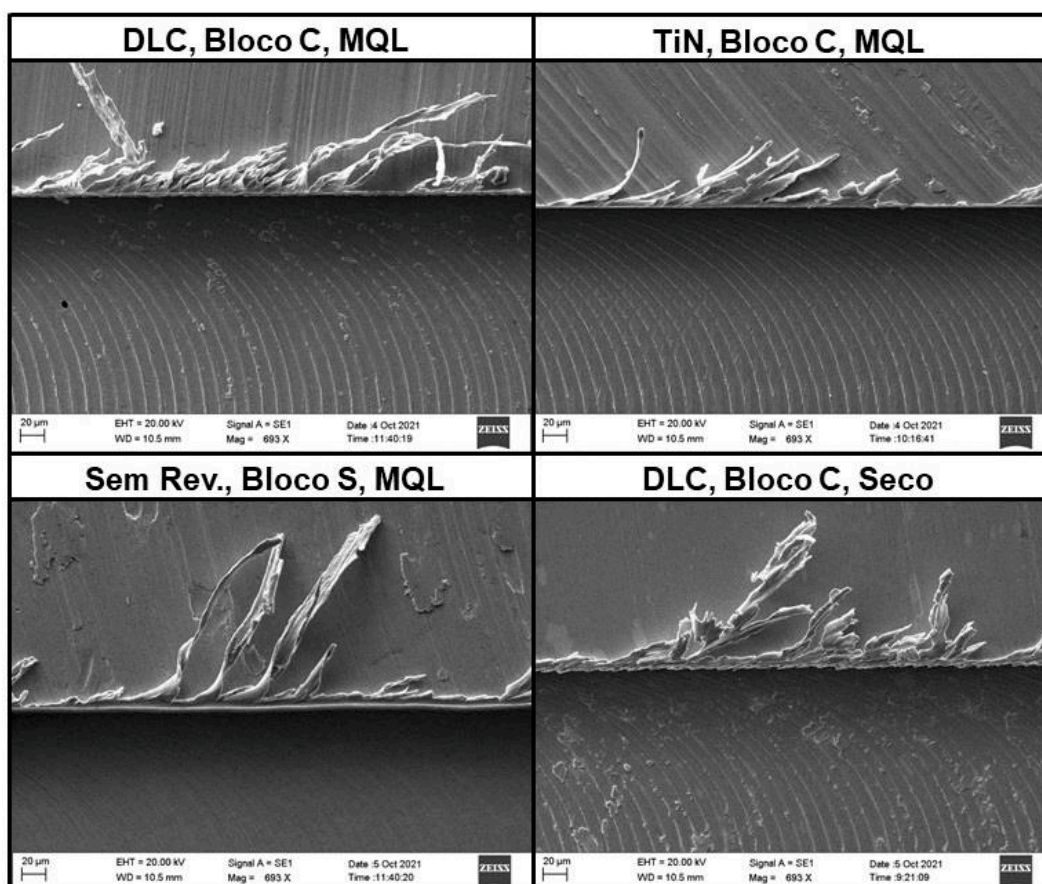


Figura 4.41 - Rebarbas do tipo pena.

Rebarbas do tipo agulha, de formação semelhante às do tipo pena, onde ocorre a fratura da rebarba primária durante o processo de usinagem, também foram observadas nos canais usinados, tanto do lado discordante, quanto do lado concordante (com menor ocorrência), conforme exemplos apresentados na Fig. 4.42, com as respectivas identificações do tipo de ferramenta utilizado, bloco e utilização ou não de fluido de corte.

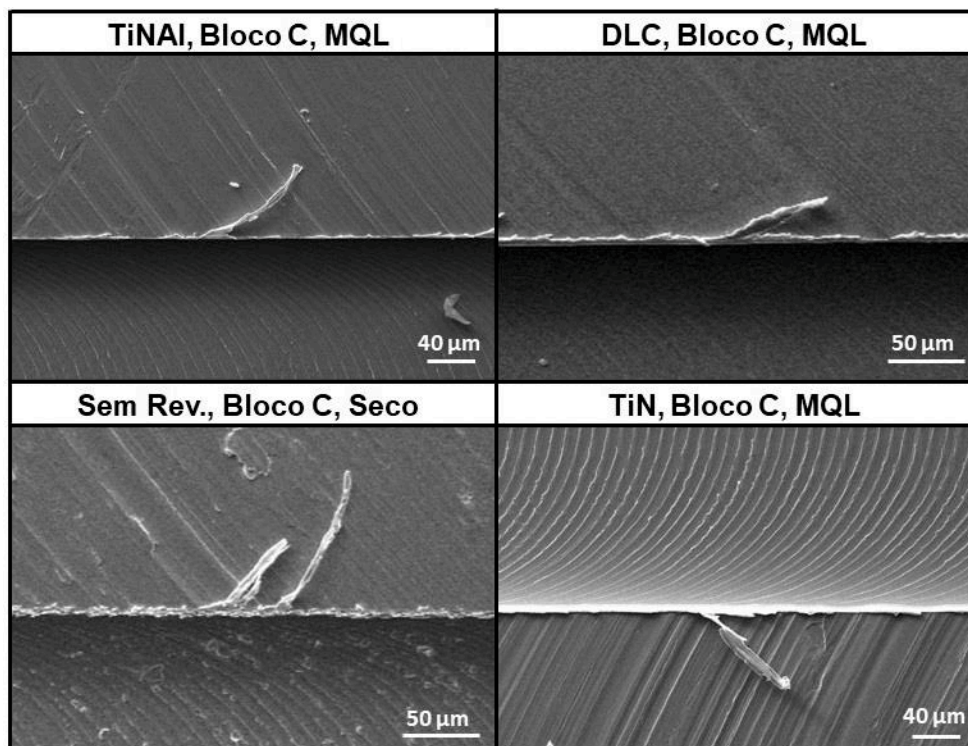


Figura 4.42 - Rebarbas do tipo agulha.

Na Fig. 4.43 são apresentados exemplos de rebarbas do tipo menor, com as respectivas identificações do tipo de ferramenta utilizado, bloco e utilização ou não de fluido de corte. A formação deste tipo de rebarba é atribuída à utilização de pequenos avanços e penetrações de trabalho. Neste estudo, estas foram observadas em maior proporção ao longo de quase todos os canais, exceto pelos pontos específicos onde foram obtidas rebarbas maiores, de diferentes tipos conforme relatado anteriormente. Rebarbas do tipo menor também foram observadas nos trabalhos de Ziberov (2018) e Dos Santos (2020).

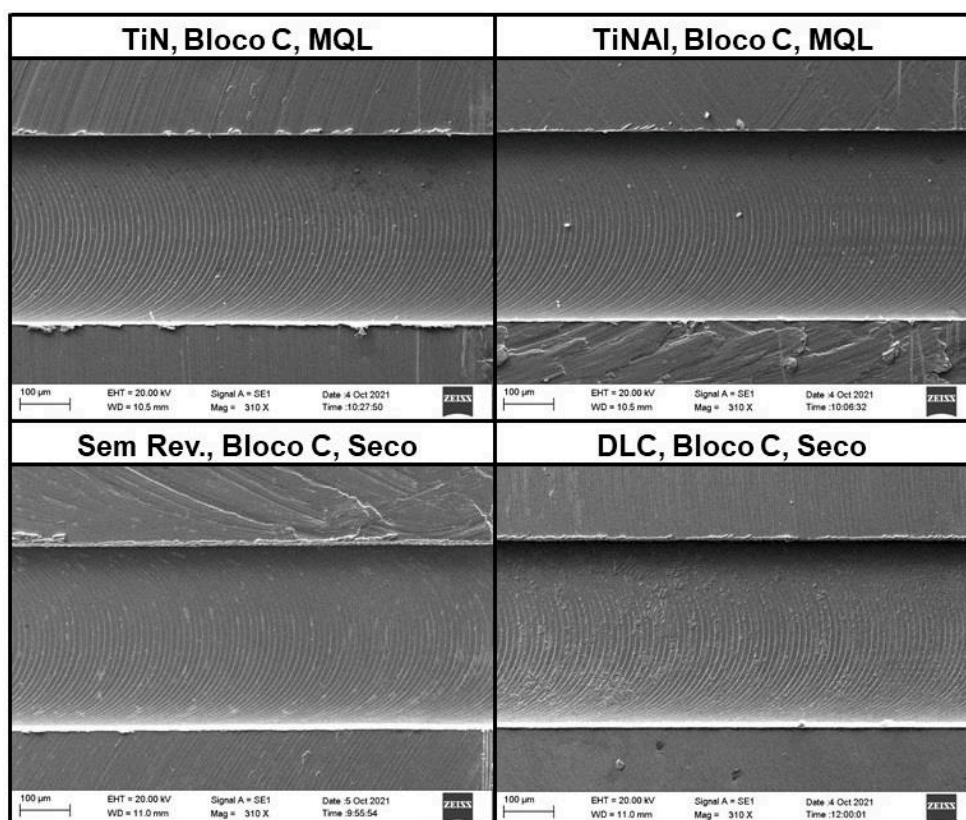


Figura 4.43 - Rebarbas do tipo menor.

Exclusivamente na microusinagem utilizando ferramenta com revestimento AlCrN, no Bloco C com MQL, foram observadas um tipo diferente de rebarbas, semelhante às rebarbas do tipo pena, porém formadas no sentido oposto (da borda para dentro do canal), conforme imagens da Fig. 4.44, que foram chamadas neste trabalho de rebarbas “invertidas”. Com destaque para as grandes dimensões observadas, um comprimento de ocorrência de 729 µm (quase 2x o diâmetro da ferramenta) e 205 µm o comprimento do cavaco mais longo (do topo à extremidade), aproximadamente 52% do diâmetro da ferramenta. Sugere-se neste trabalho, que a origem de sua formação seja semelhante às rebarbas do tipo pena, onde não ocorre a formação de cavaco e o atrito se torna predominante, empurrando o material a frente da ferramenta, que se deforma plasticamente e fratura próximo ao meio. Porém, acredita-se que a estrutura do material obtida através da estratégia de varredura do laser *Chess* (quadrados impressos de forma alternada em cada camada), tenha favorecido para que a deformação plástica ocorra de forma paralela às bordas do canal e que após a passagem completa da ferramenta naquele ponto, tensões acumuladas levem a uma ou mais fraturas da rebarba, que se deformam plasticamente no sentido contrário (para dentro do canal), gerando as rebarbas tipo pena invertida, ou ainda, as rebarbas do tipo agulha invertida, conforme ilustrado na Fig. 4.45.



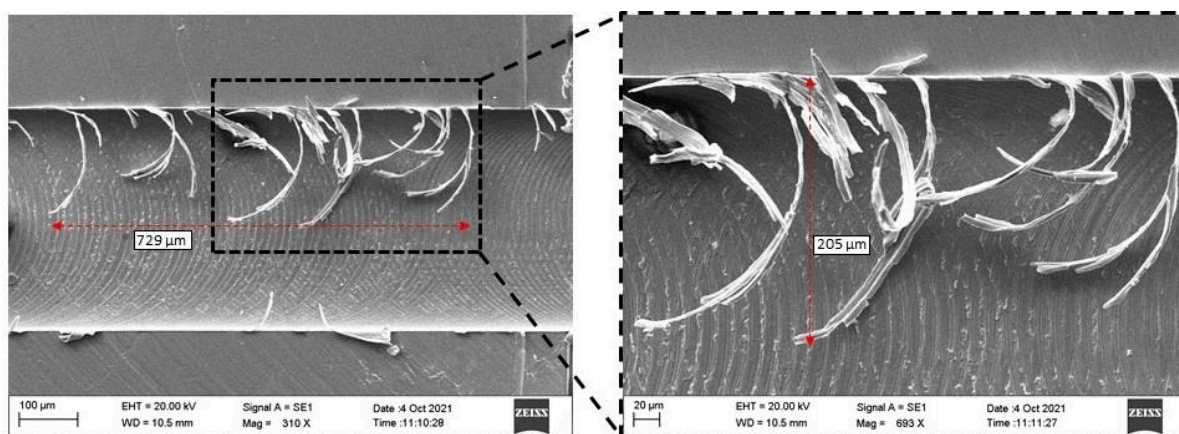


Figura 4.44 - Rebarba do tipo pena invertida.

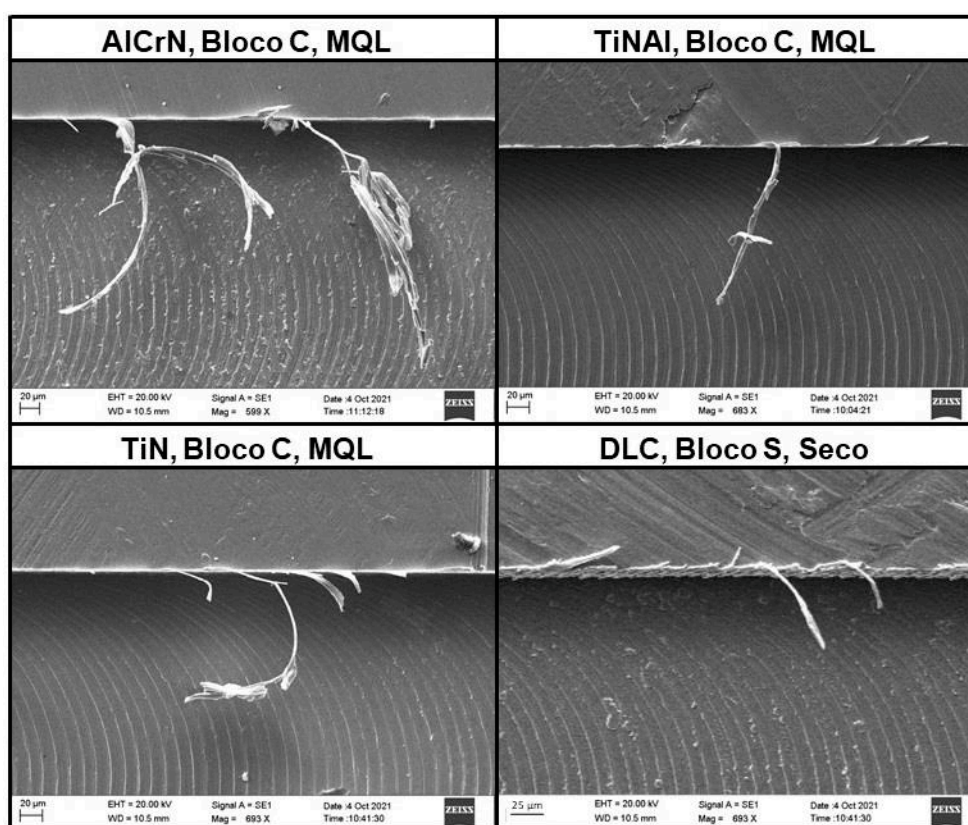


Figura 4.45 - Rebarbas do tipo agulha invertida.

Foi realizada uma análise quantitativa através da medição do comprimento das rebarbas, conforme detalhado no item 3.5.3 deste trabalho. Ressalta-se mais uma vez que esta análise aborda apenas uma comparação entre as maiores rebarbas de topo observadas em cada um dos ensaios, desconsiderando as pequenas rebarbas, que foram predominantes na grande maioria dos canais microusinados. No entanto, justifica-se a

preocupação e estudo, visto que essas rebarbas são difíceis de serem removidas e o processo de rebarbação pode danificar a peça (LEE e DORNFELD (2002).

Na Figura 4.46 são apresentados os gráficos relativos ao comprimento de rebarba, em Fig. 4.46 (a) Bloco S, seco; Fig. 4.46 (b) Bloco S, MQL; Fig. 4.46 (c) Bloco C, seco e Fig. 4.46 (c) (d) Bloco C, MQL. As maiores médias de rebarbas foram observadas do lado discordante, em todas as condições testadas, exceto na microusinagem do Bloco S, utilizando ferramenta com revestimento DLC e MQL, onde as rebarbas medidas do lado concordante são maiores. Os valores variaram entre  $17,49 \pm 8,81 \mu\text{m}$  (ferramenta com revestimento DLC, Bloco S, MQL) a  $142,80 \pm 13,76 \mu\text{m}$  (ferramenta com revestimento TiN, Bloco S, seco). Do lado concordante o comprimento médio variou entre  $7,45 \pm 2,17 \mu\text{m}$  (ferramenta sem revestimento, Bloco C, seco) a  $77,09 \pm 33,36 \mu\text{m}$  (ferramenta com revestimento AlCrN, Bloco S, seco), sendo as maiores médias de comprimento de rebarba (discordante e concordante) encontradas na usinagem do Bloco S, sem a utilização de fluido.

De uma maneira geral, a utilização de MQL, tanto no bloco S, quanto no Bloco C, favoreceu a obtenção de menores rebarbas (discordante e concordante). Para nenhum dos tipos de ferramentas, foi observada uma tendência única de formação de maiores ou menores rebarbas, quando variados os blocos e utilização ou não de fluido, sendo a menor média de comprimento de rebarba (discordante e concordante) obtida com a utilização das ferramentas sem revestimento e a maior quando utilizada as ferramentas com revestimento TiN.

Quanto a média dos comprimentos das rebarbas invertida discordante e invertida concordante, apresentadas na Fig. 4.46, pode-se concluir que os maiores comprimentos e as maiores incidências, também foram observados nos lados discordantes. Sendo o menor comprimento médio de  $-5,65 \pm 9,79 \mu\text{m}$  (ferramenta revestimento TiAlN, Bloco S, MQL) e o maior  $-101,1 \pm 94,96 \mu\text{m}$  (ferramenta com revestimento AlCrN, Bloco C, MQL). Do lado concordante, ocorreram com menor frequência, variando de  $-6,38 \pm 11,04 \mu\text{m}$  (ferramenta revestimento TiAlN, Bloco S, MQL) e o maior  $-47,83 \pm 46,38 \mu\text{m}$  (ferramenta com revestimento AlCrN, Bloco S, seco). Destaca-se ainda, que nos testes realizados no Bloco C (seco), as rebarbas invertidas surgiram apenas com a utilização da ferramenta com revestimento TiAlN e que de uma maneira geral os canais microusinados com a utilização de ferramentas sem revestimento e com revestimento DLC apresentaram pouquíssimas rebarbas invertidas (quando comparadas a outras ferramentas), apenas no Bloco S e do lado discordante.

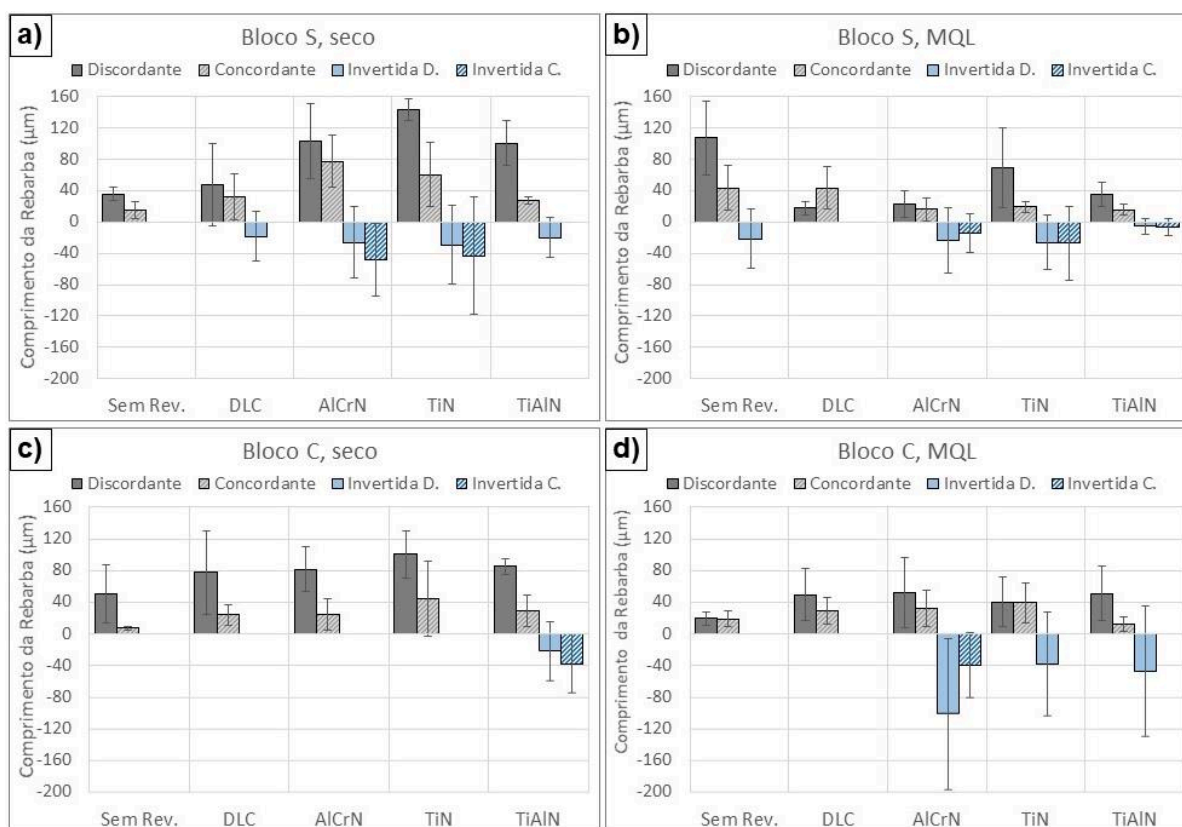


Figura 4.46 - Comprimento médio das rebarbas, em (a) Bloco S, seco; (b) Bloco S, MQL; (c) Bloco C, seco e (d) Bloco C, MQL

#### 4.4. Formação de cavacos

A análise dos cavacos na microusinagem é uma atividade complexa, devido a dificuldade de coleta e manipulação dos mesmos. Suas dimensões são muito pequenas e próximas da capacidade mínima que a estrutura do olho humano consegue enxergar (em torno de 100 µm), o que faz que esta atividade seja totalmente dependente de recursos microscópicos, da sua capacidade de ampliação e das limitações em relação ao seu princípio de funcionamento. Entretanto, o estudo e compreensão dos cavacos, bem como o seu mecanismo de formação, são essenciais na compreensão dos fenômenos envolvidos na remoção de material no microfresamento.

Ressalta-se que as imagens apresentadas nessa sessão são referentes apenas aos ensaios sem a utilização de fluido de corte, devido a dificuldade de coleta dos mesmos (quando utilizado MQL) com a técnica mencionada na seção 3.5.4 deste trabalho e a impossibilidade de limpeza das amostras para observação no MEV. As análises de tipo e forma se referem às mesmas utilizadas na macrousinagem, visto que não há um modelo de classificação exclusivo para microusinagem.



Na Figura 4.47 podem ser observados os cavacos típicos obtidos na microusinagem do aço inoxidável 316L com ferramentas de diferentes revestimentos, em (a) DLC, (b) TiN, (c) AlCrN e (d) TiAlN. Nas imagens são apresentadas regiões das amostras coletadas com maior acúmulo de cavacos. Com relação a morfologia, em sua grande maioria os cavacos identificados são do tipo contínuo, formados por lamelas justapostas.

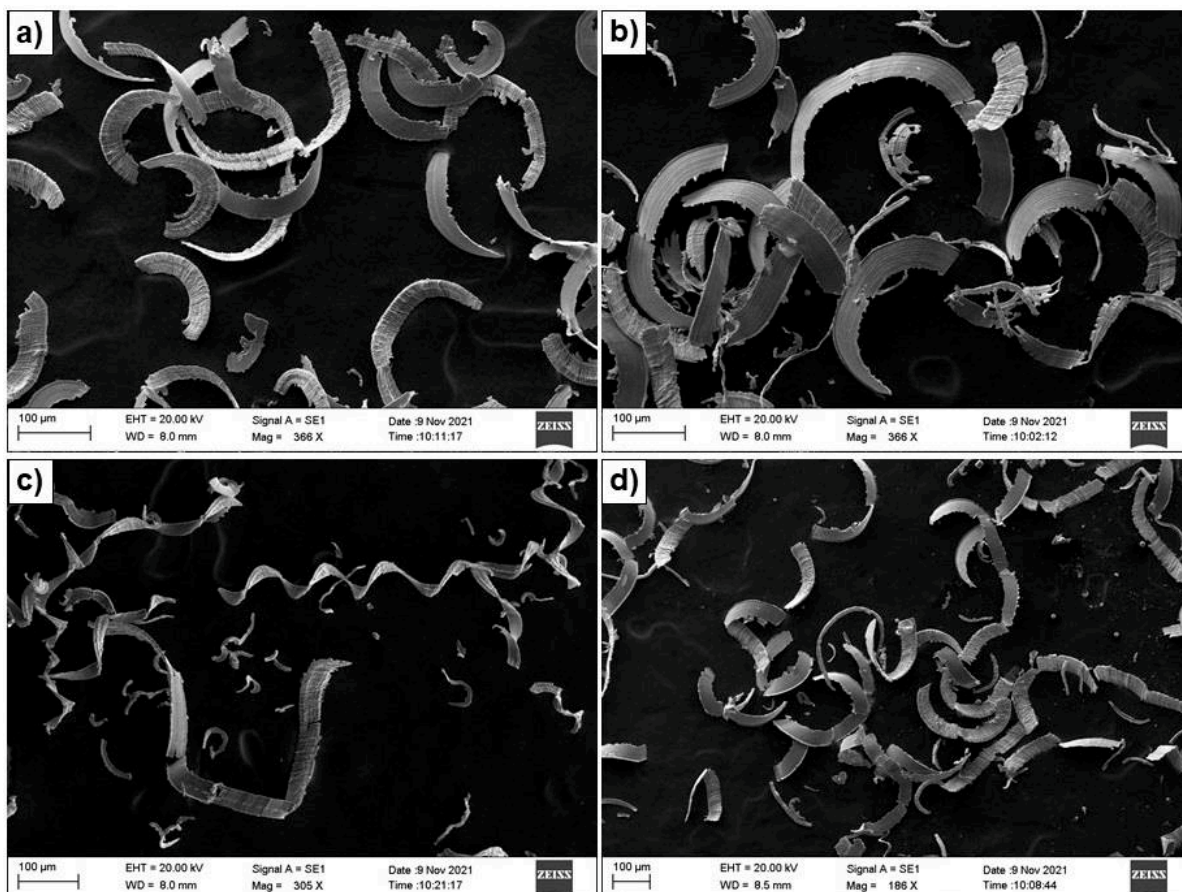


Figura 4.47 - Cavacos gerados no microfresamento com as ferramentas revestimento: (a) DLC; (b) TiN; (c) AlCrN e (d) TiAlN.

Na formação deste tipo de cavaco, o material é cisalhado na zona de cisalhamento primária com grandes deformações, permanecendo de forma homogênea, sem se fragmentar (FERRARESI, 1970). Este tipo também é característico do corte em altas temperaturas, que não se dissiparam rapidamente, levando a regiões de intenso cisalhamento seguidas de regiões relativamente indeformadas, podendo causar *attrition* e fadiga térmica, consequentemente lascamento e quebra das ferramentas (ALHADEFF et al., 2019).

Na Fig. 4.48 pode ser observado detalhes das lamelas em ampliação realizada de um cavaco do tipo contínuo, bem como algumas das medições realizadas. Em geral, a

espessura das lamelas medidas variou de 1,05 a 1,42  $\mu\text{m}$ , sendo a espessura média igual a  $1,26 \pm 0,29 \mu\text{m}$  (desvio padrão no intervalo de confiança de 95,45 %).

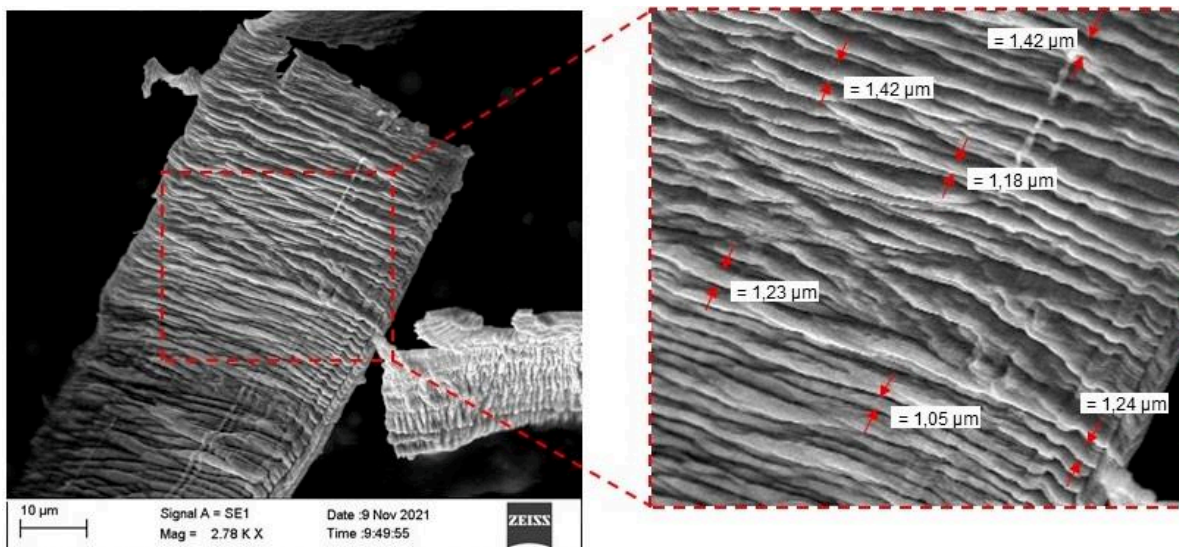


Figura 4.48 - Medição das lamelas de um cavaco tipo contínuo.

Em relação à forma dos cavacos, em sua maioria, foram identificadas as formas em fita (considerando a escala reduzida) ou em arco. Na Fig. 4.49 são mostrados exemplos destas formas de cavacos, com as respectivas medições de comprimento e largura realizados. O comprimento médio dos cavacos obtidos é de  $648,5 \pm 242,3 \mu\text{m}$  (desvio padrão no intervalo de confiança de 95,45 %), próximo do comprimento teórico do cavaco de  $622 \mu\text{m}$ , calculado para esta operação de microfresamento. Isto indica que, os cavacos em sua maioria foram formados durante a fase ativa de uma das arestas de corte. No entanto foram observados, comprimentos superiores a este, como por exemplo  $846,6 \mu\text{m}$ . Este comprimento pode ser devido ao fato do cavaco permanecer aderido à ferramenta durante a fase inativa da ferramenta e se unir ao cavaco formado no ciclo seguinte.

Ainda na Figura 4.49, foram observadas diferentes larguras de cavaco, sendo a largura média de  $37,1 \pm 9,0 \mu\text{m}$  (desvio padrão no intervalo de confiança de 95,45 %) próxima a profundidade de corte utilizada de  $40 \mu\text{m}$ . No entanto, isoladamente foram identificadas larguras menores e principalmente maiores que a profundidade. Dos Santos (2020) concluiu em seu trabalho que, no microfresamento o nivelamento da peça pode apresentar variações, que poderão influenciar a largura dos cavacos formados. No entanto, Wang et al. (2020) afirmaram que, com a limitação dos cavacos pela superfície de saída, o material tende a se deformar plasticamente dos dois lados, formando cavacos com larguras maiores que a profundidade de corte utilizada.

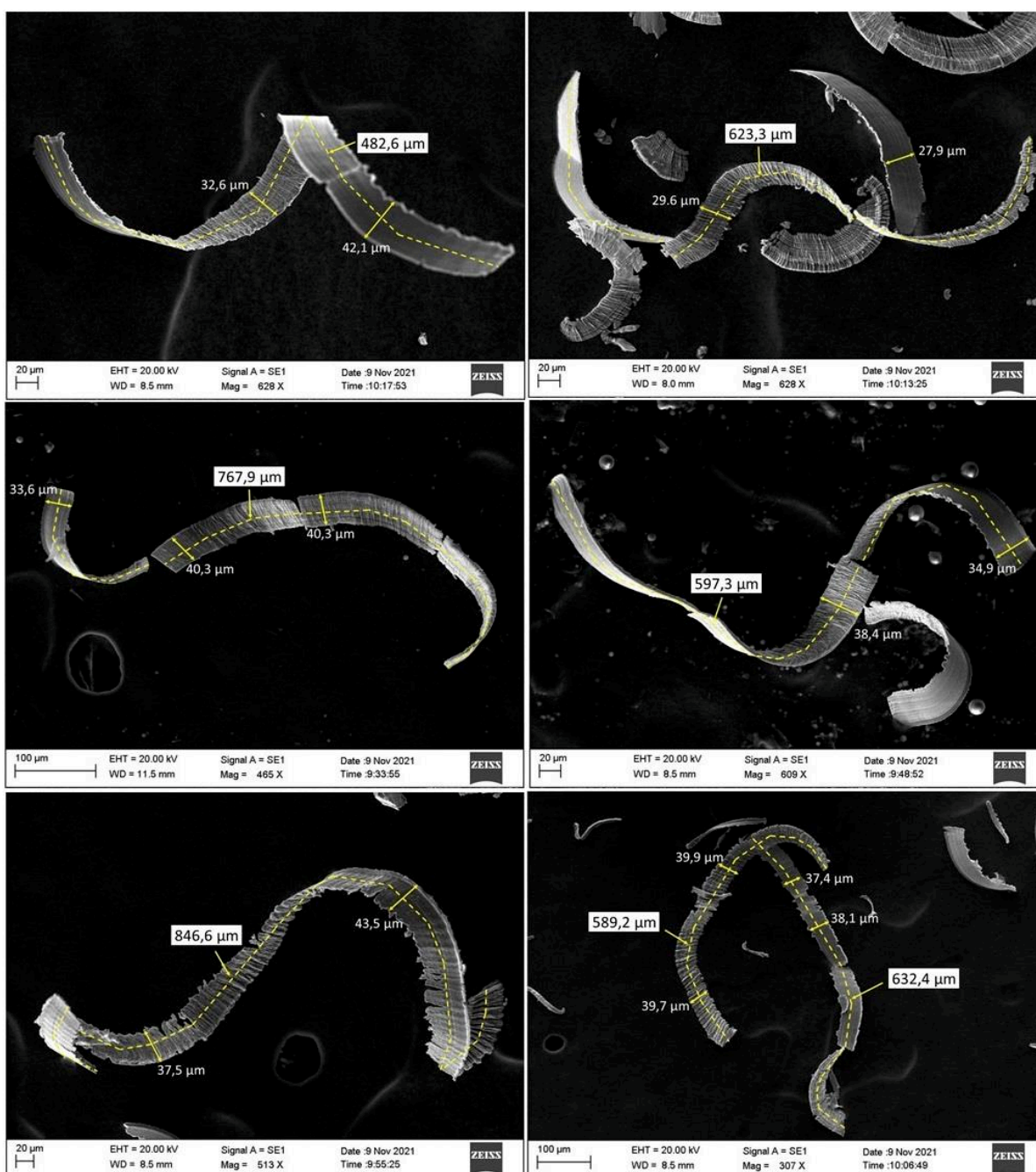


Figura 4.49 - Medição de comprimento e largura dos cavacos.

Outra forma de cavaco também observada, porém, com menor incidência, foram os cavacos helicoidais. Na Fig. 4.50 são apresentadas imagens destes cavacos, obtidos na microusinagem de canais com as ferramentas sem revestimento, em (a) a ampliação detalhada conforme identificação. De Oliveira (2019) encontrou em seus experimentos formas de cavacos semelhantes às observadas neste estudo e concluiu (porém, em função de simulação computacional) que, os cavacos helicoidais são gerados pela aresta principal de corte, enquanto os cavacos em forma de fita, são gerados pela aresta secundária de



corde. Identificou ainda que, grande parte do corte ocorreu na aresta de corte secundária, gerando desgastes significativos, semelhantes aos observados para as ferramentas sem revestimento utilizadas neste trabalho.

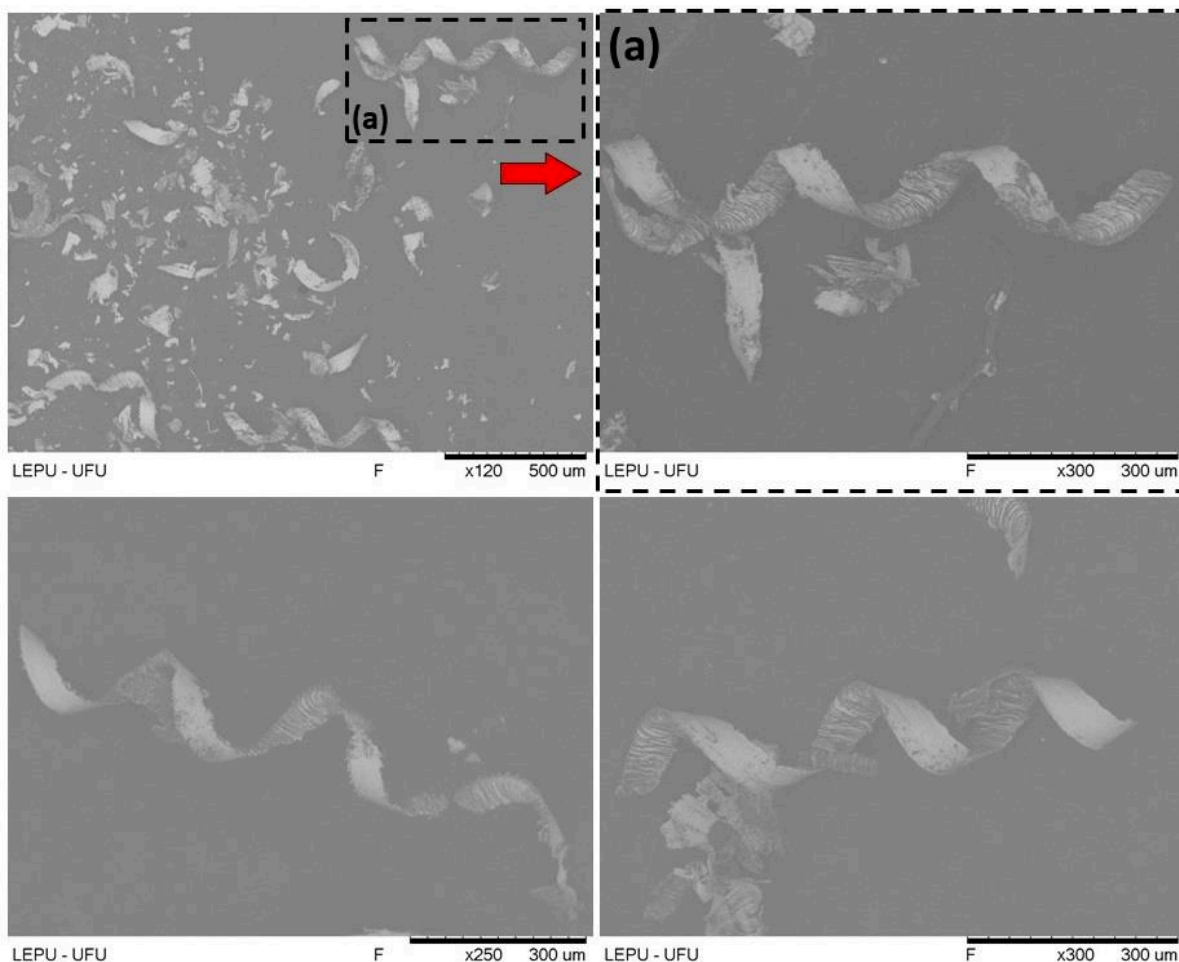


Figura 4.50 - Cavacos helicoidais observados na usinagem do Bloco C, ferramenta sem revestimento (seco), em (a) ampliação de um cavaco helicoidal.

Cavacos com forma helicoidal, foram observados também na microusinagem utilizando ferramentas com revestimento AlCrN, conforme imagem da Fig. 4.51. Ao medir a sua dimensão, considerando sua geometria, foi possível inferir que este possui comprimento de 673,8  $\mu\text{m}$ , cerca de 8 % acima do comprimento teórico do cavaco, calculado neste estudo.

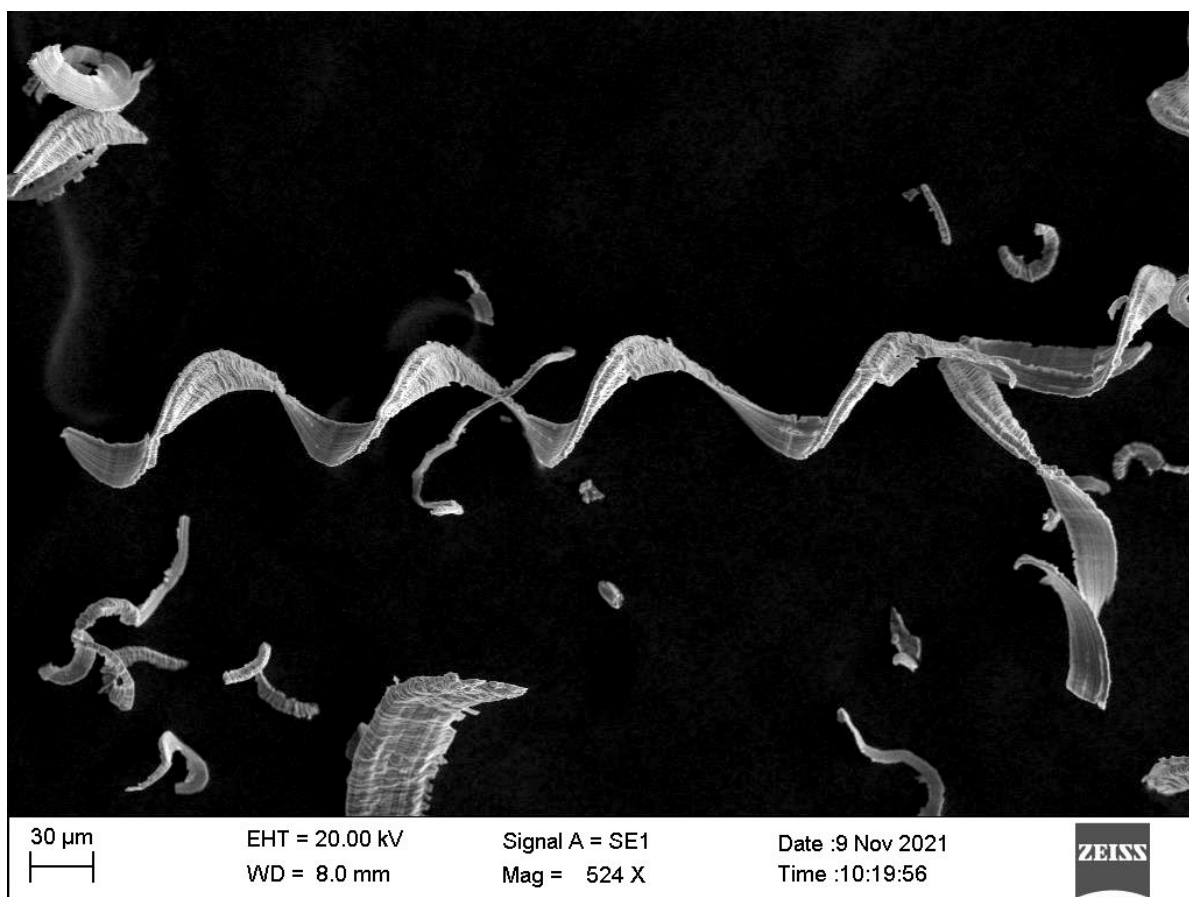


Figura 4.51 - Cavaco helicoidal obtido na microusinagem com ferramenta revestimento AICrN.

Na Figura 4.52 são mostrados exemplos de imagens dos cavacos obtidos, que estavam em posição propícia para que fossem realizadas as medições da espessura, visto que na microusinagem não é possível a manipulação dos mesmos. Conforme observado, os cavacos não possuem espessura uniforme, sendo neste caso necessária uma simplificação e, portanto, a média dos valores obtidos ( $h'$ ) foi de  $4,5 \pm 2,1 \mu\text{m}$  (com intervalo de confiança de 95,45 %).

Durante o processo de usinagem, as condições do contato existentes na interface cavaco-ferramenta e as deformações plásticas que o material sofre na zona de cisalhamento, contribuem diretamente para que a espessura do cavaco ( $h'$ ) seja maior que a espessura de corte ( $h$ ) (FERRARESI, 1970; KLOCKE, 2011), pelo menos esta é a análise para os processos de macrousinagem. Normalmente a espessura do cavaco é maior que a espessura de corte devido à restrição proporcionada pela superfície de saída da ferramenta por onde o cavaco escoia, propiciando uma desaceleração do material que resulta na deformação do cavaco (TRENT, 2000). Dessa forma, tem-se o conceito de grau de recalque ( $R_c$ ), que é uma medida da quantidade de deformação sofrida pelo cavaco, no plano de

cisalhamento primário, calculado pela razão entre a espessura do cavaco e a espessura de corte ( $h'/h$ ). Através do grau de recalque é possível calcular também o ângulo de cisalhamento teórico e a velocidade de saída do cavaco.

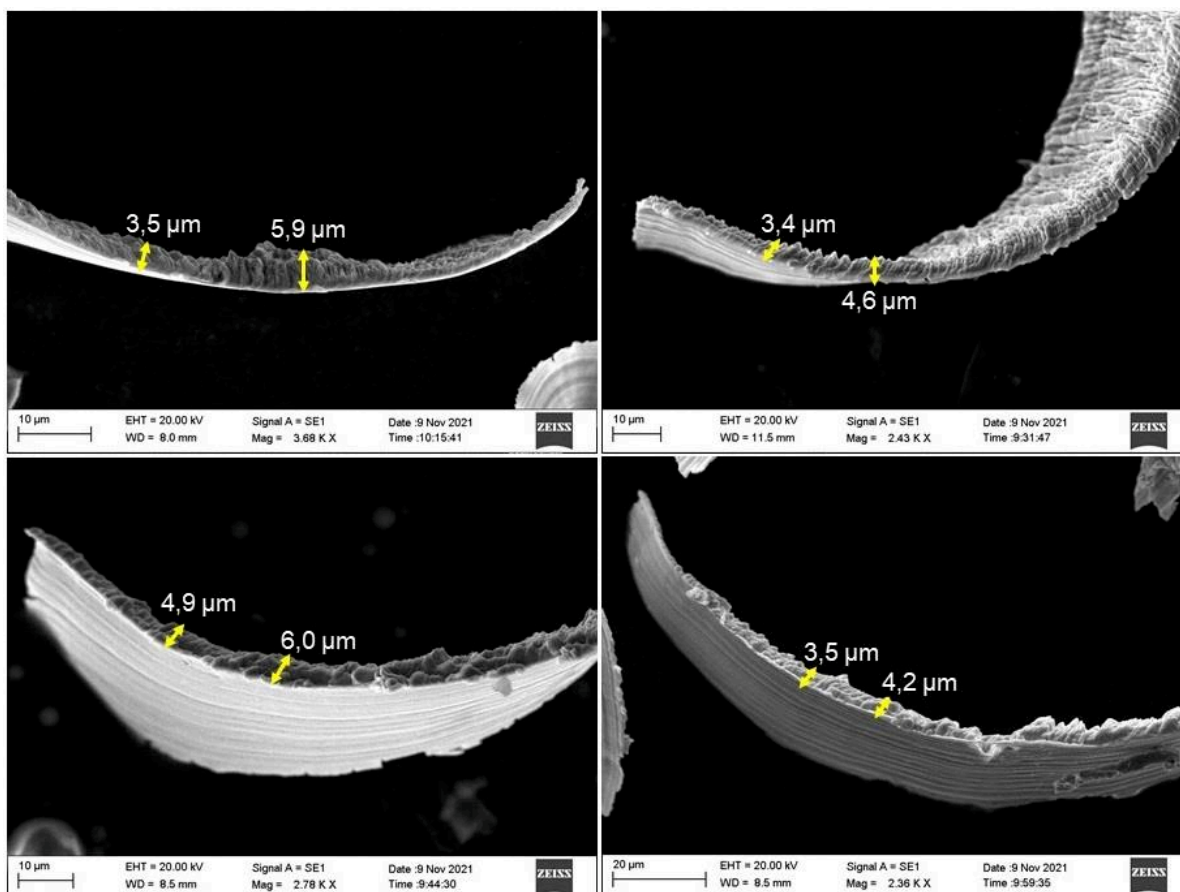


Figura 4.52 - Medição da espessura dos cavacos.

Sabendo-se que, a espessura de corte ( $h$ ) no fresamento de topo é igual ao avanço por dente de  $1 \mu\text{m}$  (utilizado neste trabalho) é possível inferir que a estimativa do grau de recalque do cavaco  $R_C$  é de 4,5. Este valor é considerado muito alto, porém típico de condições em que a espessura de corte ( $h$ ) é pequena, indicando a ocorrência de grande quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário. Teoricamente, quanto maior o grau de recalque, menor será o ângulo de cisalhamento e maiores serão os esforços de corte necessários para cisalhar o material, que conseqüentemente aumentam a energia específica, contribuindo para o efeito escala na microusinagem.

#### 4.5. Análise geral

A usinabilidade do aço inoxidável 316L obtido por fusão seletiva a laser (SLM), em duas diferentes amostras (obtidas por diferentes estratégias de varredura do *laser*), foi investigada neste trabalho, através da comparação das variáveis de saída do processo de microfresamento, realizado por microfresas com diferentes tipos de revestimentos, a seco e com fluido de corte.

Diversos fenômenos e mecanismos influenciaram o resultado final obtido nos diferentes blocos microusinados. Ao longo deste trabalho, vários destes fatores foram analisados de forma qualitativa (conforme resultados apresentados anteriormente), no entanto, em função da grande quantidade de dados e combinação de variáveis testadas, um resumo final das análises qualitativas foi gerado, conforme Fig. 4.53, a fim de apresentar uma visão geral destes, bem como propiciar a possibilidade de uma comparação rápida entre as condições testadas.

Além das análises qualitativas foram realizadas também análises quantitativas de desgaste, rugosidade média ( $R_a$ ) e comprimento de rebarba. A fim de classificar as microferramentas utilizadas em termo de desempenho, foi adotado o critério de ranqueamento, com a combinação destas análises. Destaca-se o fato de que, muitos destes desempenhos são contraditórios, quando comparadas diretamente duas variáveis de saída, dificultando assim a análise através de outros métodos.

Portanto, cada um dos diferentes tipos de ferramentas foram analisadas em função da combinação “tipo de bloco” e “utilização ou não de fluido de corte” e atribuídas notas de desempenho que variavam de 1 a 5 (crescentes do melhor para o pior) em cada um dos três itens medidos. Ao final, estes resultados foram somados, sendo as menores pontuações referentes a melhor combinação dos desempenhos individuais (destacados na Fig. 4.54 setas verdes) e, portanto, essa ferramenta é a mais indicada em termos de desempenho geral. Já as maiores somas são referentes aos piores desempenhos (destacados na Fig. 4.54 setas vermelhas), sendo esta ferramenta a menos indicada para aquela aplicação.



		Desgaste qualitativo		Rebarbas					Predominância Rebarba		Material aderido na ferramenta	Indícios de APC	Marcas Fase Inativa	Poros	Cavidades Internas		Superfícies Microusinadas - Tipo:					
		Flanco	Perda Revestimento	Primária	Agulha	Pena	Invertida	Menor	Discordante	Concordante					Início Canal	Fim Canal	1	2	3	4	5	
<b>Bloco S</b>	SECO	Sem Revestimento	MA	NA	B	-	-	-	-	B	-	A	A	-	-	MB	-			x		
		DLC	A	MA	B	B	A	B	B	A	B	-	MA	A	A	-	-		x	x		
		AlCrN	A	A	B	A	MA	MA	A	MA	A	-	MA	-	B	-	-			x		
		TiN	B	MB	B	A	MA	B	B	MA	A	A	MA	-	-	-	-		x			
		TiAlN	MB	MB	B	A	MB	-	B	B	B	B	MA	A	-	MB	-		x			x
	MQL	Sem Revestimento	A	NA	-	B	B	B	B	A	B	B	-	-	B	-	-	x				
		DLC	MA	MA	-	-	-	-	B	-	MB	-	MA	-	B	A	A		x			
		AlCrN	B	MB	-	B	-	B	B	B	-	-	-	A	B	-	A	x				x
		TiN	B	-	B	A	A	B	B	A	B	-	-	-	B	-	B	x				
		TiAlN	B	MB	MB	B	-	B	MB	B	MB	-	-	-	B	B	A	x				
<b>Bloco C</b>	SECO	Sem Revestimento	A	NA	-	B	-	-	B	B	-	-	B	-	-	-	-	x		x		
		DLC	A	A	B	-	B	-	B	A	-	A	MA	-	A	B	-		x			
		AlCrN	B	B	-	-	B	-	-	A	-	A	A	-	B	B	-	x				
		TiN	-	MB	B	-	A	-	-	A	-	-	B	-	-	B	-	x	x			
		TiAlN	B	MB	-	B	MA	B	B	A	B	A	A	A	-	B	-		x			
	MQL	Sem Revestimento	MA	NA	-	-	-	-	B	B	B	A	-	MB	-	MB	-	x				
		DLC	A	MA	MB	B	A	-	B	B	B	A	A	A	A	B	-	x	x			x
		AlCrN	B	-	-	-	-	MB	B	A	B	-	A	A	A	A	-	x				x
		TiN	MB	MB	B	A	A	MB	B	A	B	-	-	MB	MA	A	-	x				x
		TiAlN	B	B	-	B	MB	B	MB	B	-	-	-	MB	MA	A	B	x				x

**Legenda:**

MA	Muito Alto (a)
A	Alto (a)
B	Baixo (a)
MB	Muito Baixo (a)
NA	Não se aplica
-	Sem ocorrência
x	Superfícies identificadas

Figura 4.53 - Resumo das análises qualitativas.

		Ranking de Desempenho			Resultado Final	
		Desgaste	Ra (Médio)	Comprimento de Rebarba		
<b>Bloco S</b>	SECO	Sem Revestimento	5	3	1	9
		DLC	4	1	2	7
		AlCrN	3	4	4	11
		TiN	2	5	5	12 ←
		TiAlN	1	2	3	6 ←
	MQL	Sem Revestimento	5	1	5	11 ←
		DLC	4	2	3	9
		AlCrN	3	4	1	8 ←
		TiN	2	3	4	9
		TiAlN	1	5	2	8 ←
<b>Bloco C</b>	SECO	Sem Revestimento	5	1	1	7 ←
		DLC	4	2	4	10 ←
		AlCrN	3	4	3	10 ←
		TiN	1	3	5	9
		TiAlN	2	5	2	9
	MQL	Sem Revestimento	5	1	1	7 ←
		DLC	4	2	3	9
		AlCrN	2	4	5	11 ←
		TiN	1	3	4	8
		TiAlN	3	5	2	10

Figura 4.54 - Ranking de desempenho em função da combinação de análises quantitativas.

Portanto pode-se concluir que:

- **Para usinagem do Bloco S, a seco:**

Mais indicada: Ferramenta com revestimento TiAlN.

Menos indicada: Ferramenta com revestimento TiN.

- **Para usinagem do Bloco S, MQL:**

Mais indicada: Ferramentas com revestimento TiAlN e AlCrN (pontuações iguais).

Menos indicada: Ferramenta sem revestimento.

- **Para usinagem do Bloco C, a seco:**

Mais indicada: Ferramenta sem revestimento.

Menos indicada: Ferramentas com revestimento DLC e AlCrN (pontuações iguais).

- **Para usinagem do Bloco C, MQL:**

Mais indicada: Ferramenta sem revestimento.

Menos indicada: Ferramentas com revestimento AlCrN.

Destaca-se ainda que o melhor desempenho geral foi obtido pela microferramenta com revestimento TiAlN na usinagem do bloco S, sem a utilização de fluido de corte.

Os resultados obtidos poderão ser utilizados como referência para novas análises ou aplicações práticas, no entanto, é sabido que nem sempre o objetivo final desejado é o desempenho médio e combinado entre as variáveis de saída aqui testadas. Porém, em função dos desempenhos conflitantes, como por exemplo das ferramentas sem revestimento, que apesar do elevado desgaste, produzem excelentes superfícies com as mais baixas rugosidades, sugere-se a utilização das análises qualitativas e do ranking de desempenho combinados a utilização de média móvel ponderada, caso seja necessário priorizar alguma das variáveis de saída.

Por fim, é importante ressaltar que os problemas inerentes à manufatura aditiva de metais (MAM) como a grande quantidade de poros e os vazios gerados por contração na solidificação, concentrados na extremidade do material, geram imprecisão dimensional e geométrica, podendo inviabilizar a produção de peças em escala industrial em função da necessidade da remoção de grande volume de material nas extremidades, quando comparado ao tamanho final das peças que requerem detalhes microusinados, ou ainda, limitar sua utilização em componentes que necessitam de resistência mecânica, em função da presença dos rotineiros pontos de concentração de tensão. E, portanto, são problemas de processo a serem resolvidos para que tecnologia continue em ascensão, atendendo a todas as vantagens a qual se propõe.

# CAPÍTULO V

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos ensaios e análises realizados sobre o processo de microfresamento do aço inoxidável 316L SLM, em dois diferentes tipos de amostras, foram obtidas as conclusões expostas a seguir, agrupadas de acordo com os itens apresentados no Capítulo IV:

*No que se refere à análise do desgaste de ferramenta, concluiu-se que:*

- Os maiores desgastes finais foram medidos nas ferramentas sem revestimento.
- A utilização de MQL não reduziu o desgaste, inclusive foi pior para alguns revestimentos.
- As principais formas de desgaste são: o arredondamento do raio de ponta e desgaste de flanco.
- O desgaste de flanco foi observado na superfície principal de folga e na superfície secundária de folga.
- Os principais mecanismos de desgaste são: “adesão e arrastamento” e lascamento.
- Ferramentas com os revestimentos TiN, TiAlN e AlCrN, tiveram desempenho superior em relação ao desgaste.

*Quanto à rugosidade, concluiu-se que:*

- Os menores valores de Ra foram obtidos com a utilização de ferramentas sem revestimento e os maiores com ferramentas TiAlN.
- As maiores distâncias entre picos e vales (Rt e Rz), foram observadas no bloco S na condição a seco.
- Os perfis dos canais medidos possuem em média mais picos do que vales.
- Quando utilizado MQL (Bloco S e C) a maioria dos resultados de Rsk são próximos a zero, indicando que possuem boa simetria de formação de picos e vales.

- As ferramentas sem revestimento não usinaram de forma similar a ferramentas com aresta raspadora (maiores picos do que vales).
- O aumento do desgaste nas ferramentas não favoreceu o aumento das rugosidades.

*Com relação à superfície microusinada, concluiu-se que:*

- Superfícies do Tipo 1 são incidentes na maioria dos canais.
- Superfícies dos Tipos 2 e 3, são predominantes na condição a seco.
- Foram observadas marcas semelhantes às de avanço, porém mais proeminentes.
- Foram observadas porosidades prejudiciais à integridade da peça produzida por MA.
- Foram observadas cavidades internas profundas, localizadas nas extremidades dos canais.

*Com relação à formação de rebarbas, concluiu-se que:*

- O volume de rebarba é menor que o observado tipicamente em outros trabalhos de microusinagem.
- Não houve influência dos parâmetros: tipo de bloco e desgaste da ferramenta.
- Foram identificadas as rebarbas de topo: tipo primária, pena, agulha, menor, pena invertida e agulha invertida.
- As maiores médias de comprimento de rebarbas e as maiores incidências foram observadas nas superfícies usinadas no sentido discordante.
- A usinagem com a técnica MQL favoreceu a obtenção de menores rebarbas independente do sentido de corte.
- A menor média geral de comprimento de rebarba foi obtida com a utilização das ferramentas sem revestimento.

*No que se refere à formação de cavacos, concluiu-se que:*

- A maioria dos cavacos são do tipo contínuo.
- Foram identificados cavacos com forma em fita, em arco e helicoidal.
- A estimativa calculada do grau de recalque do cavaco é de 4,5, indicando grande quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário.

*E por fim, em relação à análise geral, concluiu-se que:*

- Os melhores desempenhos foram obtidos pelas ferramentas:
  - TiAlN e AlCrN, quando usinado o bloco S;
  - Ferramentas sem revestimento, quando usinado o bloco C.
- O melhor desempenho geral foi da microferramenta com revestimento TiAlN na usinagem do bloco S, sem a utilização de fluido de corte.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestão para trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa, recomenda-se:

- Realizar experimentos de microusinagem utilizando as mesmas condições de corte também no aço inoxidável 316L convencional, a fim de fazer uma comparação direta com o material impresso por SLM;
- Realizar uma investigação mais aprofundada sobre a origem das marcas semelhantes às marcas de avanço, porém com maiores dimensões (diferentes dos parâmetros utilizados);
  - Identificar condições de corte que possibilitem a prevenção de formação de rebarbas;
  - Estudar a viabilidade prática e econômica da remoção de rebarbas, utilizando processos convencionais e não convencionais.;
- Investigar a microusinabilidade de outros materiais fabricados por MA e outras estratégias de varredura do *laser*.
- Realizar simulações computacionais e validação através de testes, com maior variação dos parâmetros de corte, bem como a simulação da aplicação prática de peças fabricadas por MA, posteriormente microusinadas.
- Realização de esclerometria retilínea comparada ao efeito escala na microusinagem.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR NM ISO 1. Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. 2p, 1997.

ABNT NBR ISO 4288. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. 10p. 2008.

ALLEGRI, G.; COLPANI, A.; GINESTRA, P.S.; ATTANASIO, A. An experimental study on micro-milling of a medical grade Co-Cr-Mo alloy produced by selective laser melting. **Materials**, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12132208>

ALHADEFF, L.L.; MARSHALL, M. B.; CURTIS, D. T.; SLATTER, T. Protocol for tool wear measurement in micro-milling. **Wear**. v. 420 – 42, p. 54 – 67, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.018>

ANDREAU, O.; KOUTIRIB, I.; PEYRE, P.; PENOT, J.D.; SAINTIER, N.; PESSARD, E.; TERRIS, T.; DUPUY, C.; BAUDINE, T. Texture control of 316L parts by modulation of the melt pool morphology in selective laser melting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 264, pag. 21-31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jimatprotec.2018.08.049>

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P.T.; YANG, S.; COOKE, K.E.; TEER, D.G. Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 48, p. 1578– 1584, 2008.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011>

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. **Precision Engineering**, v. 33, n. 33, p. 402-407, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002>

ARAÚJO, M. A. Deposição e caracterização de revestimentos diamond-like carbon (DLC) sobre substrato de titânio. 2017. 61 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

ARCELORMITTAL. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações. Disponível em: <<http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>> Acesso em 23/08/2018.

ASLANTAS, K.; ÇICEK, A.; UCUN, I.; PERCIN, M.; HOPA, H. E. Performance Evaluation of a Hybrid Cooling-Lubrication System in Micro-Milling of Ti-6Al-4V Alloy. **Procedia CIRP**. v. 46, p. 492-495, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.037>

ASLANTAS, K., CICEK, A., The effects of cooling/lubrication techniques on cutting performance in micro-milling of Inconel 718 superalloy, **Procedia CIRP**, v. 77, 2018, p.77-73. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.219>

ASTAKHOV, V. P.; SHVETS, S.V.; OSMAN, M.O.M. Chip structure classification based on mechanics of its formation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 71(2), p. 247–257, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00081-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00081-2)

BAO, W.; TANSEL, I. Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 15, pp. 2155–2173, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00054-7)

BERESTOVSKYI, D.; HUNG, W. N. P. Surface Finish of Ball-End Milled Microchannels. **ICOMM**. p. 1-8, 2013. <https://doi.org/10.1115/1.4028502>

BIERMANN, D.; STEINER, M. Analysis of Micro Burr Formation in Austenitic Stainless Steel X5CrNi18-10. **45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012**, 3, pp. 97-102, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.018>

BIERMANN, D.; STEINER, M.; KREBS, E. Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel. **Procedia. CIRP**. v. 7, p. 246-251, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.042>

BISSACCO, G.; HANSEN, H.N.; DE CHIFFRE, L. Micromilling of hardened tool steel for mold making applications. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 167, n. 2-3, p. 201-207, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.029>

BOOTHROYD, G., KNIGHT, W.A., 2006, **Fundamentals of Machining and Machine Tools**, 3 ed. Edition, CRC press, Nova Iorque. ISBN 1-57444-659-2

Bourell, D.; Kruth, J.P.; Leu, M.; Levy, G.; Rosen, D.; Feese, A.M.; Clare, A. Materials for additive manufacturing. **CIRP Annals**, v. 66, p. 659-681, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>

CÂMARA, M. A.; RUBIO, J. C. C.; ABRÃO, A. M.; DAVIM, J.P. State of the art on micromilling of materials, a review. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 28, n. 8, p. 673-685, 2012. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60115-7](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60115-7)

CAMPOS, F.O.; ARAUJO, A.C.; MUNHOZ, A.L.J.; KAPOOR, S.G. The influence of additive manufacturing on the micro-milling machinability of Ti6Al4V: a comparison of SLM and commercial workpieces. *J Manuf Process*, v. 60, p. 299–307, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.006>

CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46 (3-4), p. 313-332, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015>

CHEN, N.; LI, H.N.; WU, J.; LI, Z.; LI, L.; LIU, G.; HE, N. Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, p. 1 – 64, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103670>

CHEN, M., CHEN, N., GUO, Y., WU, C., WANG, X. Study on the carbide tool wear mechanisms in micro milling stair-shape target of LiF crystal. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, 2016, p. 1163–1175. [DOI 10.1007/s00170-015-7779-6](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7779-6)

CHENG, K.; HUO, D. **Micro-Cutting – Fundamentals and Applications**. Ed. Wiley, United Kingdom, 2013. ISBN: 978-0-470-97287-8

CHERN, G.L. **Analysis of Burr Formation and Breakout in Metal Cutting**, Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, 1993.

CHERN, G. L. Development of a new and simple quick-stop device for the study on chip formation. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 45, p. 789 –794, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.013>

CHERN, G. L. Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 12-13, p. 1517-1525, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.006>

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, p. 122–129, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2006.04.001>

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing. **Singapura: World Scientific**, 2010. <https://doi.org/10.1142/6665>

COELHO, R.T.; AZEVEDO, R.; ASSIS, C. An investigation of anisotropy on AISI 316L obtained by additive manufacturing (AM) measuring surface roughness after micro-end milling operations. **In: Euspen's 18th international conference & exhibition**, Venice, 2018.

CRISTOFARO, S.; FUNARO, N.; FERITI, G.C.; 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 & Manufacture**, v. 63, pp. 16–20, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.07.005>

DE ASSIS, C.L.F.; MECELIS, G.R.; COELHO, R.T. An investigation of stainless steel 316L parts produced by powder bed fusion submitted to micro-end milling operations. **J Adv Manuf Technol**. v. 109, p. 1867–1880, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05710-2>

DENTI, L.; SOLA, A. On the effectiveness of different surface finishing techniques on A357.0 parts produced by laser-based powder bed fusion: surface roughness and fatigue strength. **Metals (Basel)**, v. 9, p.1284, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9121284>

DE OLIVEIRA, D.; GOMES, M.C.; DA SILVA, M.B. Influence of cutting fluid application frequency on the surface quality of micromilled slots on Inconel 718 alloy. **Procedia Manufacturing**. v. 48, p. 553–558, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.082>

DE OLIVEIRA, D. **Efeito Escala e Integridade Superficial no Microfresamento da Liga de Níquel Inconel 718**. 2019. 154 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

DEEV, A.A.; KUZNETCOV, P.A.; PETROV, S.N. Anisotropy of mechanical properties and its correlation with the structure of the stainless steel 316L produced by the SLM method, **Physics Procedia**, v. 83, p. 789–796, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.081>.

DIN 69090-1. MQL Machining Technology-Part 1. Terms and Definitions. **Deutsches Institut für Normung**. 9p, 2011.

DOS SANTOS, A.G. **Investigação Experimental do Microfresamento da Liga de Titânio Ti-6Al-4V**. 2020. 135 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

FERRARESI, D. **Fundamentos de Usinagem dos Metais**. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1ª Edição, 1970, 751p.

FILIZ, S.; CONLEY, C.M.; WASSERMAN, M.B.; OZDOGANLAR, O.B. An experimental investigation of micromachinability of copper 101 using tungsten carbide micro-end-mills. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, p. 1088–1100, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.024>

GERDAU. **Aço Inoxidável Gerdau-316L**. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/pt/produtos/aco-inoxidavel-gerdau-316l#ad-image-0>>. Acesso em 14/08/2018.

GILLESPIE, L.K. Deburring, an Annotated Bibliography, Volume III. **Technical Paper. Society of Manufacturing Engineers**, MRR76-07: 1–59, 1976.

GILLESPIE, L. K. Deburring precision miniature parts. **Precision Engineer**, p. 189 – 198, 1979. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(79\)90099-0](https://doi.org/10.1016/0141-6359(79)90099-0)

GONG, Y.; YANG, Y.; QU, S.; LI, P.; LIANG, C.; Zhang, H. Laser energy density dependence of performance in additive/subtractive hybrid manufacturing of 316L stainless steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p.1585-1596, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04372-z>

GOMES, M. C. **Estudo Experimental do Microfresamento do Aço AISI 316L**. 2019, 119 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

GOMES, M.C.; BRITO, L.C.; SILVA, M.B.; DUARTE, M.A.V. Tool wear monitoring in micromilling using Support Vector Machine with vibration and sound sensors. **Precision Engineering**, v. 67, p. 137-151, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.09.025>.

GOMES, M.C; SILVA, M.B.; DUARTE, M.A.V. Experimental study of micro-milling operation of stainless steel. **J Adv Manuf Technol**. v. 111(11), p. 3123–3139, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06232-7>

GOMES, M.C.; DOS SANTOS, A.G.; DE OLIVEIRA, D.; FIGUEIREDO, G.V., RIBEIRO, K.S.B., DE LOS RIOS, G.A.B.; DA SILVA, M.B.; COELHO, R.T.; HUNG, W.N.P. Micro-machining of additively manufactured metals: a review. **Int. J. of Advanced Materials and Technology**. v. 118, 2059-2078, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08112-0>

GU, D.; CHEN, H. Selective laser melting of high strength and toughness stainless steel parts: the roles of laser hatch style and part placement strategy. **Materials Science Engineering: A**, v. 725, p. 419–427, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.046>.

GU, D.; GUO, M.; ZHANG, H.; SUN, Y.; WANG, R.; ZHANG, L. Effects of laser scanning strategies on selective laser melting of pure tungsten. **International Journal of Extreme Manufacturing** 2 025001 (2020). <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab7b00>

GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 8, n. 3, p. 215-243. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>

HASHIMURA, M.; CHANG, Y.P.; DORNFELD, D. Analysis of Burr Formation Mechanism in Orthogonal Cutting. **Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering** 121(1):1–7, 1999. <https://doi.org/10.1115/1.2830569>

HAUERT, R. An overview on the tribological behavior of Diamondlike carbon in technical and medical applications. **Tribology International**. v. 37, p. 991-1003, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.07.017>

HE, Y.; XUE, G. H.; FU, J. Z. Fabrication of low cost soft tissue prostheses with the desktop 3D printer. **Scientific Reports**. 4, 6973 (2014). <https://doi.org/10.1038/srep06973>

HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES. 7 Families of Additive Manufacturing, 2022. Disponível em: <<http://hybridmanutech.com/resources/>>. Acesso em 28/02/2022.

HSIEH, W.H.; LU, M.C.; CHIOU, S.J. Application of back-propagation neural network for spindle vibration-based tool wear monitoring in micro-milling. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** V. 61 (1–4), p. 53–61, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3703-x>

HUO, D.; CHENG, K. **Micro Cutting Mechanics**. In: HUO, D.; CHENG, K. (Ed(s)). *Micro-Cutting: Fundamentals and Applications*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, p. 19 – 44, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118536605.ch2>

HOFMANN, D.C.; KOLODZIEJSKA, J.; ROBERTS, S.; OTIS, R.; DILLON, R.P.; SUH, J.; LIU, Z.; BORGONIA, J.P. Compositionally graded metals: A new frontier of additive manufacturing. **J. Mater. Res.** 29, 1899–1910 (2014). <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.208>

ISO/ASTM F52910. Additive manufacturing – design - requirements, guide-lines and recommendations, 1st Edition, ISO/ASTM International, West Conshohocken, (2018).

JAFARI, D.; WITS, W.W. The utilization of selective laser melting technology on heat transfer devices for thermal energy conversion applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 420-442, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.109>.



JI, H.; GUPTA, M.K.; SONG, Q.; CAI, W.; ZHENG, T.; ZHAO, Y.; LIU, Z.; PIMENOV, D.Y. Microstructure and machinability evaluation in micro milling of selective laser melted Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 14, p. 348-362, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.081>.

KANG, I.S., KIM, J.S., KIM, J.H., KANG, M.C., SEO, Y.W. A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 187 - 188, p. 250-255, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.155>

KERN Microtechnik. Disponível em: <<http://www.kern-microtechnik.com>>. Acesso em 14/08/2018.

KHALIQ, W.; ZHANG, C.; JAMIL, M.; KHAN, A.M. Tool wear, surface quality, and residual stresses analysis of micro-machined additive manufactured Ti-6Al-4V under dry and MQL conditions. *Tribol Int*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106408>

KHAN, W.A.; HOANG, N.M.; TAI, B.; HUNG, W.N.P. Through-tool minimum quantity lubrication and effect on machinability. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 34. P. 750-757, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.047>

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Londres: Editora Springer, 517 p, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8>

KISWANTO, G.; ZARIATIN, D. L.; KO, T. J. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, p. 435 – 450, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.05.003>

KOU, Z.; WAN, Y.; CAI, LIANG, X.; LIU, Z. Burr Controlling in Micro Milling with Supporting Material Method. **43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.015>

KUMAR, A.S.; DEB, S.; PAUL, S. Ultrasonic assisted abrasive micro-deburring of micromachined metallic alloys. *J. Manuf. Process.* v.66, p. 595–607, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.019>

KUMAR, S.P.L. Measurement and uncertainty analysis of surface roughness and material removal rate in micro turning operation and process parameters optimization. **Measurement**, v. 140, p. 538–547, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.029>

KUNZE, K.; ETTER, T.; GRÄSSLIN, J.; SHKLOVER, V. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM), **Materials Science and Engineering: A**, v. 620, p. 213–222, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.003>.

KURIAKOSE, S.; PARENTI, P.; CATALDO, S.; ANNONI, M.P.G. Micromilling of metallic feedstock produced by extrusion additive manufacturing. **In: WCMNM 2018 world congress on micro and nano manufacturing**. p. 125 - 128, 2018. [https://doi.org/10.3850/978-981-11-2728-1\\_92](https://doi.org/10.3850/978-981-11-2728-1_92)

KURZYNOWSKI, T.; GRUBER, K.; STOPYRA, W.; KUŹNICKA, B.; CHLEBUS, E. Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting. **Materials Science and Engineering: A**, v. 718, p. 64-73, 2018. ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.103>.

LEE, K.; DORNFELD, D. A. An experimental study on burr formation in micro milling aluminum and copper. **Transactions of NAMRI/SME**, v. 30, p. 1–8, 2002.

LEE, W.B.; TO, S.; SZE, Y.K.; CHEUNG, C.F. Effect of material anisotropy on shear angle prediction in metal cutting a mesoplasticity approach. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 45 , p. 1739 – 1749, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2003.09.024>

LEE, K.; DORNFELD, D.A. Micro-burr formation and minimization through process control. **Precision Engineering**, v. 29, p. 246–252, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.09.002>

LEKKALA, R.; BAJPAI, V.; SINGH, K. R.; JOSHI, S. S. Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling. **Precision Engineering**, v. 35, p. 625 - 637, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.04.007>

LI, Q.; LERMA, I.; EDINBAROUGH, I.; ALVARADO, J.; HUNG, N.P. Characterization of Micromist for Effective Machining. In: **Proc. of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition**, pp. 13-19, 2015.

<https://doi.org/10.1115/IMECE2015-53632>

LI, P.; GONG, Y. Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v.33, p. 2387-2395, 2019.

<https://doi.org/10.1007/s12206-019-0237-x>

LIN, T.R. Experimental study of formation and tool chipping in the face milling of stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 108, p. 12-20, 1999.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00573-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00573-2)

YADAV, A. K.; KUMAR, M.; BAJPAI, V.; SINGH, N. K.; SINGH, R. K. FE Modeling of Burr Size in High- Speed Micro-Milling of Ti-6Al-4V. **Precision Engineering**. v. 49, p. 287-292, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.02.017>

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Editora Blucher, 2011.

MALEKIAN, M.; PARK, S. S.; JUN, M. B. G. Tool Wear Monitoring Of Micro-Milling Operations. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 4903-4914, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.01.013>

MARATTUKALAMA, J.J.; KARLSSON, D.; PACHECO, V.; BERAN, P.; URBANWIKLUNDD, JANSSON, U.; HJÖRVARSSONA, B.; SAHLBERGB, M. The effect of laser scanning strategies on texture, mechanical properties, and site-specific grain orientation in selective laser melted 316L SS. **Materials and Design**, v. 193, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108852>

MASUZAWA, T. State of the art of micromachining. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, Amsterdam, v. 49, n. 2, p. 473-488, 2000.

[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63451-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63451-9)

MATHAI, G.; MELKOTE, S. Effect of process parameters on the rate of abrasive assisted

brush deburring of microgrooves. **Int J Mach Tools Manuf.** v. 57, p.46–54, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.02.007>.

MIAN, A.J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P.T. Chip formation in microscale milling and correlation with acoustic emission signal. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 56: 63, 2011.

<https://doi.org/10.1007/s00170-011-3185-x>

MITTAL, R. K.; KULKARNI, S. S.; SINGH, R. Effect of lubrication on machining response and dynamic instability in high-speed micromilling of Ti-6Al-4V, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 28, 2017, p. 413–421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.007>

MIYOSHI, K. Durability evaluation of selected solid lubricating films. *Wear.* v. 252, p. 1061-1067, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00759-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00759-1)

MONDRAGON UNIBERTSITATEA, **Micromilling Technology: Global review**. Disponível em:

<https://pdfs.semanticscholar.org/ee92/1b63870d58bb261dcc19bd5e200b86784819.pdf>>.

Acesso em 20/08/2018.

MUMMERY, L. **Surface texture analysis** - The Handbook. Hommelwerke GmbH. 1992.

MURPHY, S. V. e ATALA, A. 3D bioprinting of tissues and organs. **Nature Biotechnology** 32, 773–785 (2014). <https://doi.org/10.1038/nbt.2958>

NIU, Z.; JIAO, F.; CHENG, K. An Innovative Investigation on Chip Formation Mechanisms in Micro-Milling Using Natural Diamond and Tungsten Carbide Tools. **Journal of Manufacturing Processes.** v. 31, p. 382-394, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.023>

OLAKANMI, E.O.; COCHRANE, R.F.; DALGARNO, K.W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. **Progress in Materials Science.** V. 74, p. 401-477, 2015. ISSN 0079-6425. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.03.002>.

PARENTI, P.; CATALDO, S.; GRIGIS, A.; COVELLI, M.; ANNONI, M. Implementation of hybrid additive manufacturing based on extrusion of feedstock and milling. In: 47th **SME North American manufacturing research conference, NAMRC**. Elsevier BV, p. 738 - 746, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.230>

PARENTI, P.; KURIAKOSE, S.; MUSSI, V.; STRANO, M.; ANNONI, M.P.G. Green-state micro-milling of AISI316L feedstock. In: **2017 World Congress on Micro and Nano Manufacturing (WCMNM)**, p. 1 - 4, 2017.

PRAKASH, M.; KANTHABABU, M. In-process tool condition monitoring using acoustic emission sensor in microendmilling, **Mach. Sci. Technol.** v. 17 (2), p. 209–227, 2013. <https://doi.org/10.1080/10910344.2013.780541>

RIBEIRO, K.S.B.; MARIANI, F.E.; COELHO R.T. A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes. **Procedia Manufacturing**, v. 48, p. 663–670, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.158>

RIBEIRO, F. R. V. Estudo do Comportamento Tribológico de filmes DLC dopados com Ag. 2012. 63 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

RYSAVA, Z.; BRUSCHI, S. Comparison between EBM and DMLS Ti6Al4V machinability characteristics under dry micro-milling conditions. In: **Materials science forum**. Trans Tech Publications Ltd, p. 177–184, 2016. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.836-837.177>

RENISHAW, Catalogo do fabricante: **Manufatura aditiva de metais**, 2017. Disponível em: <http: [www.renishaw.com.br](http://www.renishaw.com.br)>. Acesso em 14/08/2018.

ROBINSON, G.M.; JACKSON, M.J. A review of micro and nanomachining from a materials perspective. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 167, p. 316-337, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.016>

SADIQ, M. A.; HOANG, N. M.; VALENCIA, N.; OBEIDAT, S.; HUNG, W.N.P. Experimental study of micromilling selective laser melted Inconel 718 superalloy. **Procedia Manufacturing**, v. 26, p. 983-992, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.129>.

SEYDA, V.; KAUFMANN, N.; EMMELMANN, C. Investigation of aging processes of Ti–6Al–4V powder material in laser melting. In: **Physics procedia of the 7th international conference & exhibition on photonic technologies LANE**. v. 39, p. 425–31, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.057>

SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles**. Oxford University Press, Londres, 1986.

SIDDHPURAA, M.; PAUROBALLYA, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 61, p. 27-47, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>

SILVA, L. C. **Investigação da Usinabilidade do Aço Inoxidável Duplex UNS 32205 no Microfresamento**. 2017. 137 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SILVA, L. C; DA SILVA, M.B. Investigation of burr formation and tool wear in micromilling operation of duplex stainless steel. **Precision Engineering**. v. 60, p. 178–188, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.08.006>

SIMCHI, A. Direct laser sintering of metal powders: mechanism, kinetics and microstructural features. **Materials Science and Engineering: A**, v.428, p.148–58, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.117>

SIMONEAU, A.; NG, E.; ELBESTAWI, M.A. Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p. 467-481, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.019>

SUN, S.H.; ISHIMOTO, T.; HAGIHARA, K.; TSUTSUMI, Y.; HANAWA, T.; NAKANO, T. Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar microstructure via selective laser melting. **Scripta Materialia**, v.159, 89–93, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.09.017>.

SZYDLOWSKI, M.; POWALKA, B.; MATUSZAK, M.; KOCHMANSKI, P. Machine vision micro milling tool wear inspection by image reconstruction and light reflectance, **Precision Eng.** v. 44 (1), p. 236–244, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.01.003>

TAKACS, M.; VERO, B.; MÉSZÁROS, I., Micromilling of metallic materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 138, p. 1–3, 2003.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00064-5)

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworth Heinemann, Oxford, 2000. <https://doi.org/10.1016/B978-075067069-2/50007-3>

TOYSERKANI, E; KHAJEPOUR, A.; CORBIN, S.F. Laser Cladding. 1st Edition. Florida: CRC Press LLC; 2005. ISBN 9780849321726. <https://doi.org/10.1201/9781420039177>

TORRES, C. S. **Estudo da Moagem de Alta Energia e Sinterização de Metal Duro WC-Ni**. 2009. 81 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TUCHO, W.M.; LYSNE, V.H.; AUSTBØ, H.; SJOLYST-KVERNELAND, A.; HANSEN, V. Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L. **Journal of Alloys and Compounds**. V. 740, p. 910-925, 2018. ISSN 0925-8388. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.098>.

UCUN, I.; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. An Experimental Investigation of the Effect of Coating Material on Tool Wear in Micro Milling of Inconel 718 Super Alloy. **Wear**. v. 300, n. 1-2, p. 8-19, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.103>

UCUN, I.; ASLANTAS, K.; BEDIR. The performance Of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of Inconel 718. **Precision Engineering**. v. 41, p. 135–144, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.01.002>

UEDA, K.; MANABE, K. Chip formation mechanism in microcutting of an amorphous metal. **Ann CIRP**, v. 41(1), p. 129 – 132, 1992. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61168-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61168-8)

VAZQUEZ, E.; GOMAR, J.; CIURANA, J.; RODRÍGUEZ, C. A. Analyzing Effects of Cooling and Lubrication Conditions in Micromilling of Ti-6Al-4V. **Journal of Cleaner Production**. v. 87, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.016>



VENKATESH, V.; SWAIN, N.; SRINIVAS, G.; KUMAR, P.; BARSHILIA, H. C. Review on the machining characteristics and research prospects of conventional microscale machining operations. **Materials and Manufacturing Processes**, 2016.

<https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1151045>

WALKER, T. **The MQL Handbook. A Guide to Machining With Minimum Quantity Lubrication**. 2013, 47p.

WAN, M., MA, Y., FENG, J., ZHANG, W., Study of static and dynamic ploughing mechanisms by establishing generalized model with static milling forces, *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 114, 2016, p. 120–131.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.05.010>

WANG, J.; GONG, Y.; ABBA, G.; ANTOINE, J.F.; SHI, J. Chip formation analysis in micromilling operation, **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, 45:430-447, 2009.

<https://doi.org/10.1007/s00170-009-1989-8>

WANG, Y.; ZOU, B.; WANG, J.; YOU, Y.; HUANG, C. Effect of the progressive tool wear on surface topography and chip formation in micro-milling of Ti–6Al–4V using Ti(C7N3)-based cermet micro-mill. **Tribology International**. v. 141, p. 1 – 14, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105900>

WEI, H.L.; MAZUMDER, J.; DEBROY, T. Evolution of solidification texture during additive manufacturing. **Scientific Reports**, v. 5, pag. 1–7, 2015.

<https://doi.org/10.1038/srep16446>.

WEULE, H. HUNTRUP, V.; TRITSCHLER, H. Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization. **Annals of CIRP**, v. 50 (1), p. 61-64, 2001.

[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62071-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62071-X)

ZHANG, S.J.; TO, S.; WANG, S.J.; ZHU, Z.W. A review of surface roughness generation in ultra-precision machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 91, p. 76-95, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.02.001>

ZHENG, Y.; HE, Z. Z.; GAO, Y. X.; LIU, J. Direct Desktop Printed-Circuits-on- Paper Flexible Electronics. **Scientific Reports**. 3, p. 1786, 2013. <https://doi.org/10.1038/srep01786>

ZHU, K.; HU, X. The monitoring of micro milling tool wear conditions by wear area estimation. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 93, p. 80–91, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.02.004>

ZIBEROV, M.; SILVA, M.B.; JACKSON, M.; HUNG, W. Effect of Cutting Fluid on Micromilling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 332-347, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.029>

ZIBEROV, M. **Microfresamento da Liga Ti-6Al-4V com Microferramentas com Diferentes Revestimentos e Aplicação de MQL**. 2018. 121 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

ZIBEROV, M.; OLIVEIRA, D.; SILVA, M.B.; HUNG, W.N.P. Wear of TiAlN and DLC coated microtools in micromilling of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. v. 56, p. 337-349, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.082>

ZUM GAHR, K.H. **Microstructure and wear of materials**. [S.l.]: Elsevier, 1987.