

WALTER DOS SANTOS MOTTA NETO

**PROCESSO HÍBRIDO MECÂNICO-ELETROQUÍMICO
DE USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO
DA LIGA Ti-6Al-4V**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2022

WALTER DOS SANTOS MOTTA NETO

**PROCESSO HÍBRIDO MECÂNICO-ELETROQUÍMICO DE USINAGEM
DE ULTRAPRECISÃO DA LIGA Ti-6Al-4V**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOCTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

UBERLÂNDIA - MG

2022

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

M921 Motta Neto, Walter dos Santos, 1991-
2022 Processo Híbrido Mecânico-Eletroquímico de Usinagem de
Ultraprecisão da liga Ti-6Al-4V [recurso eletrônico] /
Walter dos Santos Motta Neto. - 2022.

Orientador: Arthur Alves Fiocchi.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.376>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Fiocchi, Arthur Alves, 1981-
, (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 337, COPEM				
Data:	28/07/2022	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	19:00
Matrícula do Discente:	11723EMC009				
Nome do Discente:	Walter dos Santos Motta Neto				
Título do Trabalho:	Processo Híbrido Mecânico-Eletroquímico de Usinagem de Ultraprecisão da Liga Ti-6Al-4V				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Projeto FAPEMIG APQ – 01759-17				

Reuniu-se via <https://us02web.zoom.us/j/87583314079?pwd=VnVUazNwb0Rma296dnJ3WVNEekJrdz09> a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Rosenda Valdés Arencibia - FEMEC/UFU; Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU; Washington Martins da Silva Júnior - FEMEC/UFU; Luiz Eduardo de Angelo Sanchez - UNESP/Bauru; Renato Goulart Jasinevicius - USP/São Carlos; e Arthur Alves Fiocchi - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Arthur Alves Fiocchi, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do 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):

Aprovado.

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

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 **Renato Goulart Jasinevicius, Usuário Externo**, em 28/07/2022, às 18:52, 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 **Arthur Alves Fiocchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/07/2022, às 18:53, 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 **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/07/2022, às 18:53, 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 28/07/2022, às 18:53, 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 **Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, Usuário Externo**, em 28/07/2022, às 18:53, 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 28/07/2022, às 18:54, 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, informando o código verificador **3772978** e o código CRC **A5E32915**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao suporte e zelo dos meus pais e da minha irmã, que sempre me apoiam nas minhas escolhas e torcem pelas minhas conquistas, me incentivando sempre a estar crescendo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi, pela paciência, pelas oportunidades de aprendizado, e por estar presente em todas as etapas de desenvolvimento do trabalho, contribuindo veemente para a realização do mesmo, auxiliando com ideias e soluções aos problemas encontrados.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, pela possibilidade em realizar este curso de pós-graduação.

À CAPES, CNPq e principalmente à FAPEMIG, pelo apoio financeiro, em destaque ao projeto FAPEMIG APQ – 01759-17, ao qual esta pesquisa se encontra vinculada.

Aos demais professores, técnicos de laboratórios, e colegas de pós-graduação, pelos conselhos, suporte e apoio fundamental que contribuíram para a evolução desta pesquisa, em especial ao Me. Carlos Eduardo Dorigatti Cruz e Me. João Gabriel Contrucci, responsáveis por fornecer amostras da liga Ti-6Al-4V.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem contribuir para o crescimento do trabalho.

Por fim, agradeço de modo geral a todos que se dedicaram em me ajudar e participaram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento da minha formação pessoal e profissional.

MOTTA-NETO, W. S. **Processo Híbrido Mecânico-Eletroquímico de Usinagem de Ultraprecisão da liga Ti-6Al-4V**. 2022. 238 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

A fabricação de características e componentes mecânicos em escala micrométrica de trabalho, associados à ascensão da área industrial de miniaturização, tem demandado o aprimoramento e desenvolvimento de técnicas capazes de suprir as necessidades impostas em termos de acabamento superficial e de tolerâncias dimensionais e macrogeométricas. A microusinagem associada ao hibridismo entre as diferentes fontes de energia surgem como técnicas promissoras capazes de atender os exigentes critérios de precisão geométrica. Nesse contexto, este trabalho tem como principal objetivo produzir peças que apresentem valores de rugosidades superficiais nanométricas ($Ra < 100$ nm), por meio da associação entre ensaios mecânicos abrasivos de microrretificação à uma preparação prévia superficial eletroquímica de passivação realizados em amostras da liga Ti-6Al-4V. Para tanto, uma minimáquina foi adaptada para a microrretificação, em que os aparatos projetados e fabricados para os ensaios eletroquímicos foram também utilizados sem danificar a sua estrutura. Inicialmente foram realizados ensaios mecânicos em que microcanais foram produzidos em superfícies lixadas (não passivadas) e os valores de rugosidade encontrados foram utilizados como referência para comparação da influência da eletroquímica anteriormente à usinagem mecânica. Os resultados obtidos demonstraram uma redução numérica expressiva nos valores dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rz , Rp , Rv e Rt , na ordem de 62 %, 64 %, 72 %, 78 %, 63 % e 75 %, respectivamente, comprovando haver uma influência positiva em termos do acabamento superficial quanto a passivação prévia por eletroquímica. Imagens topográficas dos canais microusinados considerando uma profundidade de corte constante e variável não detectaram a presença significativa de rebarbas nas bordas laterais. O menor valor obtido de rugosidade superficial Ra ao longo do comprimento usinado foi igual a 33 nm, possibilitando o enquadramento da técnica desenvolvida como de ultraprecisão.

Palavras-chave: microrretificação; passivação superficial; hibridismo; acabamento superficial; ultraprecisão

MOTTA-NETO, W. S. **Hybrid Mechanical-Electrochemical Process for Ultraprecision Machining of Ti-6Al-4V alloy**. 2022. 238 f. Ph. D. Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia/MG, Brazil.

ABSTRACT

The manufacture of features and mechanical components on a micrometer scale, associated with the rise of the industrial area of miniaturization, has demanded the improvement and development of techniques capable of fulfilling the imposed needs in terms of surface finish and dimensional and macrogeometric tolerances. Micromachining associated with the hybridism among different energy sources emerges as promising ideas and capable of attend the demanding criteria of geometric precision of the results obtained. In this context, the main objective of this work is to produce workpieces that present nanometric surface roughness ($Ra < 100$ nm), through the association between microgrinding abrasive mechanical tests and a previous electrochemical passivation surface preparation, in samples of Ti-6Al-4V. To this end, a mini-machine was adapted for the development of microgrinding, in which the devices designed and manufactured for the electrochemical tests were also used to protect its structure. Initially, microgrinding tests were performed machining microslots on grounded with abrasive papers surfaces (non-passivated) and the roughness values found were used as reference for comparing the influence of electrochemical preparation prior to mechanical machining. The results obtained showed an expressive numerical reduction on the values of the roughness parameters Ra , Rq , Rz , Rp , Rv and Rt , in the range of 62 %, 64 %, 72 %, 78 %, 63 %, and 75 %, respectively, proving to have a positive influence in terms of surface finish regarding the previous passivation by electrochemical. Topographic images of the micromachined channels considering a constant and variable depth of cut did not detect the significant presence of burrs on the lateral edges. The lowest value obtained for Ra was 33 nm, allowing the classification of the technique as ultraprecision.

Keywords: microgrinding; surface passivation; hybridism; surface finish; ultraprecision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema da aresta de corte em (a) escala macrométrica e (b) escala micrométrica (adaptado de ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).....	8
Figura 2.2 - Efeito das condições de fresamento e da escala da usinagem sobre a energia específica de corte (adaptado de OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2013).....	10
Figura 2.3 - Relação entre a energia específica de corte e a espessura do cavaco não deformado para ferramentas de diamante em condição nova e gasta (adaptado de LUCCA e SEO, 1993)	11
Figura 2.4 - Esquema do processo de remoção de material em (a) na retificação em macroescala e em (b) na microrretificação (adaptado de YA-DONG <i>et al.</i> , 2018).....	11
Figura 2.5 - Representação esquemática do efeito da espessura mínima de cavaco (adaptado de CHAE <i>et al.</i> , 2006).	13
Figura 2.6 - Imagens em situação (a) real e (b) de projeto de uma microfresadora 5 eixos (BANG <i>et al.</i> , 2004).....	16
Figura 2.7 - Centro de nanorretificação (adaptado de AURICH <i>et al.</i> , 2015).....	16
Figura 2.8 - Classificação da microrretificação com base na taxa de remoção de material e no tamanho do abrasivo (adaptado de MIYASHITA, 1985 <i>apud</i> BRINSKMEIER <i>et al.</i> , 2010). 18	
Figura 2.9 - Esquema do processo de remoção de material durante as operações de microrretificação em (a) plana tangencial (adaptado de WEN; GONG, 2017) e em (b) plana frontal (adaptado de CHENG; GONG, 2014)	19
Figura 2.10 - Exemplos de componentes fabricados por microrretificação em (a) dispositivo microfluídico (AURICH <i>et al.</i> , 2009) e em (b) microcanal em silício (AURICH <i>et al.</i> , 2015)	20
Figura 2.11 - Representação esquemática de um rebolo monocamada com ligante eletrodepositado (adaptado de Wenfeng <i>et al.</i> , 2017)	21
Figura 2.12 - Exemplos de pontas montadas com abrasivos de diamante e diâmetro igual a (a) 600 μm (CHENG; GONG, 2014) e (b) 4 μm (AURICH <i>et al.</i> , 2015).....	23
Figura 2.13 - Em (a) esquema do processo de fabricação de microferramentas abrasivas, em (b) ponta diamantada produzida com abrasivos de 0,5 μm a 2 μm e em (c) ponta diamantada produzida com abrasivos de 5 μm a 10 μm (adaptado de PARK <i>et al.</i> , 2010).....	23

Figura 2.14 - Interação física entre o abrasivo e a superfície da peça na retificação (adaptado de ZUM, 1987; SINHOFF, 1997; BRINKSMEIER <i>et al.</i> , 2010 <i>apud</i> FIOCCHI, 2014).....	24
Figura 2.15 - Variação entre o mecanismo de remoção de material na retificação com a razão entre avanço e rotação do rebolo e a dimensão média das partículas abrasivas (adaptado de NAMBA <i>et al.</i> , 1993).	26
Figura 2.16 - Esquema das etapas de remoção de material durante a retificação de material dúctil (adaptado de KLOCKE, 2009).	27
Figura 2.17 - Modelo esquemático da formação de cavaco na retificação de materiais frágeis (adaptado de INASAKI, 1987).	28
Figura 2.18 - Modelo numérico de distribuição da temperatura durante a microrretificação (adaptado de DING <i>et al.</i> , 2016)	30
Figura 2.19 - Esquema representativo do <i>chatter</i> na retificação (adaptado de THOMAZELLA <i>et al.</i> , 2019).	32
Figura 2.20 - Topografias superficiais em 3D do flanco do dente de uma engrenagem em situação de (a) ausência e (b) presença de <i>chatter</i> durante a retificação (LIU <i>et al.</i> , 2016).....	33
Figura 2.21 - Esquema representativo de um sistema mecânico para realização e monitoramento de ensaios de microrretificação (adaptado de JIN; CHENG, 2017).	35
Figura 2.22 - Relação entre a rugosidade R_a e as variáveis de corte (a) V_w , (b) ap e (c) V_s , durante a microrretificação em amostras de safira (adaptado de JIN e CHENG, 2017).....	36
Figura 2.23 - Exemplos na utilização da usinagem eletroquímica para fabricação de (a) roda de turbina para turbocompressores (adaptado de GIESE, 2005 <i>apud</i> KLOCKE <i>et al.</i> , 2014) e (b) microfuros em chapas de Ti-6Al-4V (LI <i>et al.</i> , 2016).....	37
Figura 2.24 - Esboço da distribuição de densidade de corrente elétrica contínua na usinagem eletroquímica (adaptado de KOCK <i>et al.</i> , 2003)	38
Figura 2.25 - Esquema da usinagem eletroquímica (adaptado de KUMAR <i>et al.</i> , 2018).....	39
Figura 2.26 - Em (a) peça de Ti60 bruta de trabalho, em (b) modelo em formato final de um <i>blisk</i> (KLOCKE <i>et al.</i> , 2014) e em (c) filetes usinados eletroquimicamente (XU <i>et al.</i> , 2016)	41
Figura 2.27 - Análise comparativa da taxa de remoção de material na utilização dos eletrólitos de NaCl e de NaNO ₃ (adaptado de SILVA NETO <i>et al.</i> , 2006)	43
Figura 2.28 - Canais eletroquimicamente usinados em níquel com diferentes durações de pulso (KOCK <i>et al.</i> , 2003)	44

Figura 2.29 - Configuração experimental de polarização (adaptado de IVANOV <i>et al.</i> , 2015)	45
Figura 2.30 - Curva de polarização potenciodinâmica para a liga Ti-13Nb-13Zr (adaptado de ASSIS e COSTA, 2007)	46
Figura 2.31 - Direcionamento do fluxo de corrente ao em (a) não considerar e em (b) considerar o isolamento das superfícies laterais da ferramenta (adaptado de LIU <i>et al.</i> , 2017).....	48
Figura 2.32 - Em (a) microssuperfície semiesférica com 60 μm de diâmetro usinada no topo de um cilindro por microfresamento eletroquímico e em (b) matriz de furos com diâmetro de 40 μm usinados por microfuração eletroquímica com múltiplos eletrodos (KIM <i>et al.</i> , 2005). ...	49
Figura 2.33 - Matriz de microcanais usinados por meio da micro-ECM (KUNAR e BHATTACHARYYA, 2019).....	49
Figura 2.34 - Esquema representativo em (a) da retificação eletroquímica (adaptado de HASÇALIK e ÇAYDAS, 2007) e em (b) da ação do abrasivo durante a remoção de material (Fonte: FIOCCHI, A.)	51
Figura 2.35 - Mecanismo de remoção de material durante a ECG (adaptado de BHATTACHARYYA e DOLOI, 2020).....	53
Figura 2.36 - Imagens em MEV de uma superfície usinada em (a) por ECM e em (b) por ECG (adaptado de GE <i>et al.</i> , 2019).....	54
Figura 2.37 - Influência da tensão elétrica na rugosidade R_a em peças de Ti-6Al-4V usinadas pelo processo de retificação eletroquímica (adaptado de HASÇALIK e ÇAYDAS, 2007)	55
Figura 2.38 - Contribuintes para a remoção de material durante a micro-ECG (adaptado de SAPRE <i>et al.</i> , 2013)	57
Figura 2.39 - Estrutura alveolar usinada por micro-ECG (LAUWERS <i>et al.</i> , 2014).	57
Figura 2.40 - Efeito do método de retificação (puramente abrasiva e eletroquímica) na razão G em rebolos com abrasivos de SiC e de diamante (adaptado de ZABORSKI <i>et al.</i> , 2004).....	58
Figura 2.41 - Diagrama esquemático do processo em microescala combinado de abrasão-eletroquímica proposto pelos autores (adaptado de ZHU <i>et al.</i> , 2011)	59
Figura 2.42 - Em (a) esquema do processo utilizado para ECG e em (b) superfície final retificada eletroquimicamente (adaptado de MOGILNIKOV <i>et al.</i> , 2016).....	60
Figura 2.43 - Imagens em MEV das superfícies usinadas por meio do processo de (a) retificação <i>creep-feed</i> (b) usinagem eletroquímica (c) hibridismo entre ambos (GE <i>et al.</i> , 2019).....	61

Figura 2.44 - Imagens, em MEV, na entrada e na parede lateral de microfuros produzidos por microusinagem eletroquímica com a utilização de dois tipos de ferramenta: uma lisa e outra abrasiva com partículas de diamante (TAK; MOTE, 2021).....	62
Figura 2.45 - Retificabilidade de ligas metálicas em % (adaptado de MARINESCU <i>et al.</i> , 2007)	64
Figura 2.46 - Imagens em corte transversal, via MEV, indicando a camada de óxidos formada em peças de titânio, segundo estudos de (a) Dhobe <i>et al.</i> (2011) e (b) Li <i>et al.</i> (2004).....	65
Figura 2.47 - Microestrutura da liga Ti-6Al-4V recozida (ampliação 280x) (THORTON; COLANGELO, 1985)	66
Figura 2.48 - Relação entre os parâmetros de rugosidade R_a e R_z com a velocidade de corte V_s na microrretificação de Ti-6Al-4V (adaptado de KADIVAR <i>et al.</i> , 2018).....	67
Figura 2.49 - Influência da velocidade de avanço na rugosidade superficial durante a usinagem eletroquímica em peças de Ti-6Al-4V (adaptado de HE <i>et al.</i> , 2018)	68
Figura 3.1 - Fluxograma resumido abordando as principais etapas relacionadas aos procedimentos experimentais desenvolvidos durante a pesquisa.....	71
Figura 3.2 - Em (a) desempenho de granito, em (b) suporte de aço ABNT 1045, em (c) porta-peças, em (d) conjunto montado para etapa de lixamento e em (e) amostra de Ti-6Al-4V com superfície preparada.....	74
Figura 3.3 - Vistas em perspectiva isométrica da (a) morsa mecânica, (b) base metálica e (c) bucha de Tecnil [®] projetadas e fabricadas para os ensaios de usinagem.....	75
Figura 3.4 - Vista em corte dos elementos mecânicos da morsa com destaque para a região da bucha de fixação à mesa da minimáquina-ferramenta.....	76
Figura 3.5 - Fixação do relógio comparador à estrutura da minimáquina.....	76
Figura 3.6 - Sistema para fixação e nivelamento das peças	77
Figura 3.7 - Pontas montadas eletrolíticas e com abrasivos de diamante.....	78
Figura 3.8 - Projeto em perspectiva isométrica (a) da cuba eletrolítica e (b) do reservatório de eletrólito utilizados para os ensaios abrasivos e eletroquímicos de usinagem	80
Figura 3.9 - Em (a) esquema representativo do sistema de bombeamento e filtragem de fluido de corte e em (b) imagem do sistema montado na minimáquina	82
Figura 3.10 - Desenho esquemático da variável f_{za}	85
Figura 3.11 - Imagem, em MEV, da vista superior frontal do microrrebolo. O ligante de níquel é mostrado nas regiões claras enquanto as partículas abrasivas nas escuras.....	86
Figura 3.12 – Esquema da operação de usinagem de um microcanal por microrretificação ..	88

Figura 3.13 - Diagrama esquemático do sistema montado para ensaio da curva de polarização da liga Ti-6Al-4V no LTM da FEMEC (UFU)	90
Figura 3.14 - Esquema representativo da delimitação da área a ficar submersa para ensaio eletroquímico de passivação superficial da liga Ti-6Al-4V	92
Figura 3.15 - Diagrama esquemático resumido para determinação da espessura da camada de passivação na amostra de Ti-6Al-4V	93
Figura 3.16 - Esquema de posicionamento suporte-peça, destacando a conexão elétrica com a fonte de tensão para passivação da superfície	95
Figura 3.17 - Bancada experimental para realização dos ensaios de oxidação superficial nas peças de Ti-6Al-4V no LMD da FEMEC (UFU).....	97
Figura 3.18 - Representação da operação de usinagem de microcanais em uma superfície desnivelada na ordem de + 5 μm	98
Figura 3.19 - Representação dos ensaios de microrretificação assistida por eletroquímica realizado nas nove amostras preparadas	100
Figura 3.20 - Exemplificação da operação de nivelamento do perfil bruto da superfície por meio do método dos mínimos quadrados (plataforma <i>MountainsLab 9</i>).....	106
Figura 4.1 - Fluxograma resumido abordando os principais resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa	109
Figura 4.2 - Microestrutura da liga Ti-6Al-4V, com ampliação de 1 000 x	110
Figura 4.3 - Imagens, em MEV, dos diferentes modelos adquiridos de ponta montada.....	111
Figura 4.4 - Imagens, em MEV, da superfície do microrrebolo em (a) na condição inicial e após a usinagem variando-se V_s em (b) 2,65 m/s, (c) 2,00 m/s, (d) 1,35 m/s e (e) 0,70 m/s, para uma mesma V_w igual a 30 mm/min e a_p de 2 μm	112
Figura 4.5 - Imagens, em MEV, dos canais usinados adotando-se V_w igual a (a) 2,5 mm/min, (b) 5,0 mm/min e (c) 10,0 mm/min, para um mesmo a_p de 5 μm e V_s de 1,35 m/s.....	113
Figura 4.6 - Imagens, em MEV, da ferramenta modelo (a) 1 e (b) 2, após a fabricação de canais microrretificados a um a_p de 25 μm , V_w 90 mm/min e V_s 2,00 m/s.....	114
Figura 4.7 - Imagens, em MEV, dos canais usinados considerando a utilização dos microrrebolos modelo (a) 1 - D91, (b) 2 - D46 e (c) 3 - D126, para uma mesma condição de corte (V_s 2,65 m/s, a_p 5 μm e V_w 60 mm/min).....	115
Figura 4.8 - Rugosidade superficial R_a nos canais microrretificados em peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação	116

Figura 4.9 - Rugosidade superficial Rq nos canais microrretificados nas peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação	117
Figura 4.10 - Rugosidade superficial Rz nos canais microrretificados nas peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação	117
Figura 4.11 - Rugosidade superficial Rp nos canais microrretificados nas peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação	117
Figura 4.12 - Rugosidade superficial Rv nos canais microrretificados nas peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação	118
Figura 4.13 - Rugosidade superficial Rt nos canais microrretificados nas peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação	118
Figura 4.14 - Imagens, em MEV, dos microcanais usinados a um V_s de 1,35 m/s (30 000 rpm) para diferentes a_p (5 μ m, 10 μ m e 15 μ m) e V_w (30 mm/min, 60 mm/min e 90 mm/min)....	119
Figura 4.15 - Imagens, em MEV, dos microcanais usinados a um V_s de 2,00 m/s (45 000 rpm) para diferentes a_p (5 μ m, 10 μ m e 15 μ m) e V_w (30 mm/min, 60 mm/min e 90 mm/min)....	120
Figura 4.16 - Imagens, em MEV, dos microcanais usinados a um V_s 2,65 m/s (60 000 rpm) para diferentes a_p (5 μ m, 10 μ m e 15 μ m) e V_w (30 mm/min, 60 mm/min e 90 mm/min).....	121
Figura 4.17 - Integridade superficial do microrrebolo após a usinagem considerando uma profundidade a_p de (a) 5 μ m, (b) 10 μ m e (c) 15 μ m, à V_s de 1,35 m/s e V_w 60 mm/min. ...	123
Figura 4.18 - Perfil de rugosidade nivelado e filtrado (Gauss) obtido considerando V_s igual a 2,00 m/s, V_w 90 mm/min e a_p de 5 μ m	124
Figura 4.19 - Imagens, em MEV, do microrrebolo na situação (a) antes e em (b) após a realização do experimento adotando-se n igual a 60 000 rpm, V_w 90 mm/min e a_p 10 μ m. .	125
Figura 4.20 - Curva de polarização potenciodinâmica ensaiada em meio 10 % NaCl para a liga Ti-6Al-4V	129
Figura 4.21 - Imagem em MEV da superfície da peça (a) antes e (b) após o ataque eletroquímico para obtenção da curva de polarização potenciodinâmica do Ti-6Al-4V.	130
Figura 4.22 - Relação gráfica entre a tensão elétrica, em Volts, e a espessura da camada de passivação resultante, em nm, para um eletrólito com concentrações de 5 % e 10 % de NaCl	131
Figura 4.23 - Imagens, em MEV, da seção transversal das peças de Ti-6Al-4V destacando a camada passivada formada sob a face superior em diferentes condições de concentração do eletrólito NaCl (5 % e 10 %) e tensão elétrica (2 V, 4 V e 6 V).	132

Figura 4.24 - Comportamento da tensão e da corrente elétrica no tempo de passivação de 1 s nas condições (a) 2 V (mesmo resultado para NaCl 5 % e NaCl 10 %), (b) 4 V (mesmo resultado para NaCl 5 % e NaCl 10 %), (c) 6 V e concentração 10 % e (d) 6 V e concentração 5 %...	134
Figura 4.25 - Concentração pós análise elementar da seção transversal da peça Ti-6Al-4V após ensaio de passivação a uma tensão de 2 V e tempo de passivação 1 s com uma solução eletrolítica de concentração 5 % NaCl	135
Figura 4.26 - Resultado do ensaio de passivação da superfície da peça Ti-6Al-4V a uma tensão de 6 V e tempo de ataque eletroquímico igual a 10 s	136
Figura 4.27 - Imagens, em MEV, da seção transversal das peças, em diferentes condições de usinagem, em que a parte branca em destaque representa a camada passivada formada sob a face superior	137
Figura 4.28 - Relação gráfica entre tensão elétrica, em Volts, e espessura da camada passivada resultante, em nm, para diferentes tempos passivação em uma solução eletrolítica 5 % NaCl	138
Figura 4.29 - Variação da tensão e da corrente elétrica a um tempo de passivação da liga Ti-6Al-4V de 1 segundo nas tensões (a) 2 V, (b) 4 V e (c) 6 V	139
Figura 4.30 - Rugosidade superficial Ra nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem	143
Figura 4.31 - Rugosidade superficial Rq nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem	144
Figura 4.32 - Rugosidade superficial Rz nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem	144
Figura 4.33 - Rugosidade superficial Rp nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem	144
Figura 4.34 - Rugosidade superficial Rv nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem	145
Figura 4.35 - Rugosidade superficial Rt nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem	145
Figura 4.36 - Em (a) perfil de rugosidade e em (b) imagem superficial, em MEV, do canal microrretificado com Vs 1,35 m/s, Vw 30 mm/min e ap 5 μ m, em uma superfície passivada à tensão de 4 V e tempo de 1 s	147

- Figura 4.37 - Imagens, em MEV, do microrrebolo após a usinagem mecânica em superfícies passivadas a uma tensão de 6 V e diferentes tempos de passivação (a) 1 s, (b) 10 s e (c) 20 s, para um V_w de 30 mm/min, V_s de 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, e a_p de 5 μ m e a_p variável. 148
- Figura 4.38 - Comparação entre os valores de rugosidade para as respectivas condições que forneceram o menor Ra (ambas usinadas com $V_w = 30$ mm/min, $a_p = 5$ μ m e $V_s = 2,65$ m/s) em superfícies preparadas mecanicamente (lixamento #180) versus eletroquimicamente (tensão elétrica de 6 V e tempo de 20 s). 149
- Figura 4.39 - Imagem, em MEV, no interior de canais microrretificados em uma superfície (a) preparada mecanicamente (lixamento #180) e em (b) preparada eletroquimicamente (lixamento #180 seguido de passivação a tensão de 6 V e tempo de 20 s), na condição em que foi obtido o menor valor de rugosidade Ra para ambos os casos sendo V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p 5 μ m..... 150
- Figura 4.40 – Imagens em MEV exemplificando em (a) microsulcamento e em (b) microcorte 153
- Figura 4.41 - Imagens topográficas dos microcanais fabricados a um a_p constante de 5 μ m em peças de Ti-6Al-4V passivadas em diferentes condições de tensão (2 V, 4V e 6 V) e tempo de passivação (1 s, 10 s e 20 s), para um mesmo V_w 30 mm/min e as numerações 1, 2 e 3 referente à V_s adotada, igual a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, respectivamente. 155
- Figura 4.42 - Imagens em MEV dos canais microrretificados a um V_w 30 mm/min, a_p 5 μ m e (a) 1,35 m/s, (b) 2,00 m/s e (c) 2,65 m/s, para uma superfície de Ti-6Al-4V passivada à tensão de 2 V e tempo passivação 10 s. 156
- Figura 4.43 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s. 157
- Figura 4.44 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s. 158
- Figura 4.45 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s. 158

Figura 4.46 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s.	159
Figura 4.47 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s.	159
Figura 4.48 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s.	160
Figura 4.49 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.	160
Figura 4.50 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.	161
Figura 4.51 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.	161
Figura 4.52 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.	162
Figura 4.53 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.	162
Figura 4.54 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.	163
Figura 4.55 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.	163
Figura 4.56 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.	164

Figura 4.57 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.	164
Figura 4.58 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.	165
Figura 4.59 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.	165
Figura 4.60 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.	166
Figura 4.61 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.	166
Figura 4.62 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.	167
Figura 4.63 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.	167
Figura 4.64 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.	168
Figura 4.65 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.	168
Figura 4.66 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.	169
Figura 4.67 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.	169

Figura 4.68 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.	170
Figura 4.69 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.	170
Figura 4.70 - Valores médios de Ra no interior dos microcanais usinados a um ap variável, com barra de erros associada ao desvio padrão das leituras (68 %).	171
Figura 4.71 - Imagens topográficas dos microcanais fabricados a um ap variável (até 5 μ m) em peças de Ti-6Al-4V passivadas em diferentes condições de tensão (2 V, 4 V e 6 V) e tempo de passivação (1 s, 10 s e 20 s), para um mesmo V_w de 30 mm/min, e as numerações 1, 2 e 3 referente à V_s adotada, igual a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, respectivamente.	174
Figura 4.72 - Imagens em MEV dos canais microrretificados a um V_w de 30 mm/min, ap variável e V_s iguais a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada à tensão de 4 V e tempo passivação 10 s, nas posições de inicial, central e final, para o sentido positivo de crescimento de ap	175
Figura 4.73 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a uma V_s de 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.	173
Figura 4.74 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a uma V_s de 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.	174
Figura 4.75 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a uma V_s de 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.	175
Figura 7.1 - Amostra de Ti-6Al-4V após preparação para desenvolvimento do ensaio de polarização, destacando o fio elétrico fixado na face traseira da peça para conexão com o potenciostato, a área exposta para o ataque eletroquímico e o isolamento elétrico das demais regiões com cera mel e base incolor.	208

Figura 7.2 - Em (a) vista frontal do reservatório utilizado como cuba eletrolítica para realização do ensaio de polarização e em (b) vista superior representando o posicionamento dos eletrodos no interior do reservatório, destacando os componentes do sistema montado.....	209
Figura 7.3 - Topografia superficial e imagens em MEV de um canal microrretificado considerando os parâmetros de corte V_w igual a 30 mm/min, a_p igual a 5 μ m e V_s de 1,35 m/s, sob uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão 2 V e tempo de passivação de 10 s, destacando a formação de rebarbas nos lados discordante e concordante de usinagem.	210
Figura 7.4 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s ..	212
Figura 7.5 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s. .	213
Figura 7.6 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s ..	214
Figura 7.7 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s	215
Figura 7.8 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s	216
Figura 7.9 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s	217
Figura 7.10 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.....	218
Figura 7.11 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.....	219

Figura 7.12 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.....	220
Figura 7.13 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.....	221
Figura 7.14 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.....	222
Figura 7.15 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.....	223
Figura 7.16 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s	224
Figura 7.17 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.....	225
Figura 7.18 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.....	226
Figura 7.19 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.....	227

Figura 7.20 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.....	228
Figura 7.21 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.....	229
Figura 7.22 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s	230
Figura 7.23 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.....	231
Figura 7.24 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.....	232
Figura 7.25 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.....	233
Figura 7.26 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.....	234
Figura 7.27 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo <i>software MountainsLab Premium9</i> no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e ap variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.....	235

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Diferenças entre a retificação macro e micrométrica (adaptado de PARK, 2008)	18
Tabela 2.2 - Propriedades de alguns materiais abrasivos (adaptado de MALKIN; GUO, 2008)	21
Tabela 2.3 - Relação entre a rugosidade Ra e os valores de <i>cut-off</i> (ABNT, 2008).....	35
Tabela 2.4 - Comparação entre os processos de ECM e micro-ECM (adaptado de BHATTACHARYYA <i>et al.</i> , 2004).....	48
Tabela 2.5 - Composição química da liga Ti-6Al-4V (ASTM B265, 2015).....	67
Tabela 3.1 - Composição química dos principais constituintes da liga Ti-6Al-4V avaliada ...	72
Tabela 3.2 - Matriz de planejamento fatorial completo 3 x 3 x 3 para a microrretificação	87
Tabela 3.3 - Planejamento experimental 3 x 2 referente à determinação do crescimento da camada de passivação formada sob a superfície da peça	91
Tabela 3.4 - Planejamento 3 x 3 para passivação da superfície em peças da liga Ti-6Al-4V ..	96
Tabela 3.5 - Cálculo das incertezas-padrão de medição para cada grandeza considerada	103
Tabela 3.6 - Parâmetros e condições de usinagem investigados	107
Tabela 4.1 - ANOVA para o Ra dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w	126
Tabela 4.2 - ANOVA para o Rq dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w	126
Tabela 4.3 - ANOVA para o Rz dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w	127
Tabela 4.4 - ANOVA para o Rp dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w	127
Tabela 4.5 - ANOVA para o Rv dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w	127
Tabela 4.6 - ANOVA para o Rt dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w	127
Tabela 4.7 - ANOVA para o Ra dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e V_s	151

Tabela 4.8 - ANOVA para o Rq dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e Vs	151
Tabela 4.9 - ANOVA para o Rz dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e Vs	151
Tabela 4.10 - ANOVA para o Rp dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e Vs	151
Tabela 4.11 - ANOVA para o Rv dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e Vs	152
Tabela 4.12 - ANOVA para o Rt dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e Vs	152
Tabela 4.13 - Valores médios e desvio padrão das leituras para o parâmetro de rugosidade Ra dos microcanais usinados a um ap variável.....	172

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ae: penetração de trabalho

ANOVA: Análise de Variância

ap: profundidade de corte

APPJ: *Atmospheric Pressure Plasma Jet*

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CC: corrente contínua

CNC: Controle Numérico Computadorizado

D_0 : diâmetro inicial de furos pré-fabricados

D_1 : diâmetro médio dos furos pós-micro-ECG

D: deformação do material

DIN: *Deutsches Institut für Normung*

dg: dimensão das partículas abrasivas

e: elétrons

ECG: *Electrochemical Grinding*

ECM: *Electrochemical Machining*

f: avanço em [mm/rot]

GUM: Guia para a Expressão da Incerteza de Medição

h: espessura do cavaco não deformado

ISO: *International Organization for Standardization*

J: densidade de corrente [mA/cm²]

k: fator de abrangência

k_s : pressão específica de corte [N/mm²]

Mb: Metal base

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

MQL: Mínima Quantidade de Lubrificante

num: número de leituras de medição

n: rotação da ferramenta de corte

N: número de elétrons da camada de valência

OH^- : ânion hidroxila

p -valor: probabilidade de significância

q : fluxo total de calor

R_a : desvio aritmético médio do perfil avaliado em [μm]

r_e : raio da aresta de corte

R_{ku} : fator de achatamento do perfil avaliado (*kurtosis*)

R_p : altura máxima do pico do perfil em [μm]

R_q : desvio médio quadrático do perfil avaliado em [μm]

R_{sk} : fator de assimetria do perfil avaliado (*skewness*)

R_t : altura total do perfil em [μm]

R_v : profundidade máxima do vale do perfil em [μm]

R_z : altura máxima do perfil em [μm]

s : desvio padrão em [μm]

S_q : rugosidade média quadrática

Ti: titânio

TRM': Taxa específica de remoção de material

$u(x)$: Incerteza padrão da variável x

$U(x)$: Incerteza expandida da variável x

$u_c(x)$: Incerteza padrão combinada da variável x

UFU: Universidade Federal de Uberlândia

V : tensão elétrica

V_s : velocidade de corte

V_w : velocidade de avanço da mesa

$\bar{x}(Med)$: média aritmética das leituras de medição

α : ângulo de saída da ferramenta

λ : comprimento de onda eletromagnética

δ : energia específica de corte [J/mm^3]

ΔA_R : correção associada ao raio da ponta do apalpador

ΔD : correção associada à deformação do material durante a medição

ΔIC : correção associada à incerteza de calibração do perfilômetro

$\Delta Resol$: correção associada à resolução do perfilômetro

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Microusinagem	6
2.1.1 Efeito Escala.....	8
2.1.2 Formação de cavaco na microusinagem	12
2.1.3 Máquinas-ferramentas.....	14
2.2 Microrretificação.....	17
2.2.1 Rebolos.....	20
2.2.2 Mecanismos de remoção de material	24
2.2.3 Vida do rebolo (Relação G)	28
2.2.4 Temperatura	29
2.2.5 Vibrações mecânicas	31
2.2.6 Rugosidade.....	34
2.3 Usinagem Eletroquímica.....	37
2.3.1 Mecanismo de remoção de material.....	38
2.3.2 Influência dos parâmetros de usinagem na taxa de remoção de material	40
2.3.3 Eletrólito.....	41
2.3.4 Usinagem eletroquímica com corrente elétrica pulsada.....	43
2.3.5 Curva de polarização.....	45
2.3.6 Micro-ECM.....	47
2.4 O processo híbrido abrasivo-eletroquímico	50
2.4.1 Mecanismo de remoção de material da retificação eletroquímica	51
2.4.2 Acabamento superficial.....	54
2.4.3 A escala micro.....	56
2.4.4 Estado da técnica.....	57
2.5 Material da peça: Titânio e suas ligas	63
2.5.1 Liga Ti-6Al-4V	65
CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1 Obtenção e preparação dos corpos de prova.....	72

3.2 Dispositivo de fixação das peças	74
3.3 Microrrebolos.....	77
3.4 Adaptação da minimáquina e condução dos ensaios mecânicos	79
3.4.1 Parâmetros de microrretificação	83
3.4.2 Matriz de planejamento experimental para a microrretificação.....	87
3.5 Caracterização eletroquímica da liga Ti-6Al-4V	88
3.5.1 Curva de polarização potenciodinâmica	89
3.5.2 Ensaios de passivação do material (preliminares)	90
3.5.3 Determinação da espessura da camada passivada.....	92
3.6 Ensaios eletroquímicos e o híbrido	94
3.6.1 Passivação do material	95
3.6.2 Microrretificação assistida por eletroquímica.....	98
3.7 Medições e análises.....	101
3.7.1 Rugosidade.....	101
3.7.2 Incerteza de medição.....	102
3.7.3 Análise estatística.....	103
3.7.4 Avaliação por microscopia eletrônica e EDS.....	104
3.7.5 Integridade estrutural da ferramenta	104
3.7.6 Perfilometria 3D.....	105
3.7.7 <i>Software MountainsLab Premium 9</i>	105
3.7.8 Quadro resumo das variáveis de entrada e saída.....	107
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	108
4.1 Preparação e caracterização das peças	110
4.2 Ensaios preliminares de microrretificação – Determinação do modelo de ferramenta	111
4.3 Avaliação quantitativa e qualitativa dos canais microrretificados ao se considerar as superfícies preparadas mecanicamente	116
4.3.1 Acabamento superficial dos canais microrretificados.....	116
4.3.2 Avaliação estatística.....	126
4.4 Processo eletroquímico	128
4.4.1 Curva de polarização	128
4.4.2 Crescimento da camada de passivação – ensaios eletroquímicos preliminares.....	130
4.4.3 Passivação superficial das amostras – ensaios eletroquímicos definitivos.....	136

4.5 A inventividade do Projeto de Pesquisa.....	141
4.6 Avaliação quantitativa e qualitativa dos canais microrretificados ao se considerar as superfícies preparadas eletroquimicamente	143
4.6.1 Canais usinados com <i>ap</i> constante	143
4.6.1.1 <i>Análise estatística</i>	150
4.6.1.2 <i>Mecanismo de remoção de material</i>	152
4.6.1.3 <i>Topografias superficiais</i>	154
4.6.2 Canais usinados com <i>ap</i> variável	157
4.6.2.1 <i>Topografias superficiais e a análise via o software MountainsLab</i>	173
4.7 Análise final e o Protocolo do Pedido de Patente	178
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	180
CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	185
APÊNDICES	206
ANEXOS	236

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As crescentes demandas industriais por microcomponentes e microssistemas levaram ao desenvolvimento de micro e nanotecnologias. Tecnologias emergentes de miniaturização se tornaram potenciais tecnologias-chave para a produção de componentes mecânicos na faixa micrométrica aplicados em diversas áreas da fabricação, incluindo a óptica, eletrônica, medicina, biotecnologia, comunicações e aeronáutica.

A microusinagem tornou-se um importante processo para a fabricação de micropeças, associada a uma variedade de materiais, geometrias e interfaces funcionais. Por abranger técnicas modernas que integram máquinas-ferramentas de precisão e modernos sistemas de controle numérico, como pode ser visto na microfuração, microfresamento, microtorneamento e microrretificação. Trabalhos e pesquisas nessa área são fundamentais para difundir o conhecimento e contribuir cada vez mais para o seu crescimento.

Alguns exemplos de produção em escala micrométrica via microusinagem são a fabricação de microbocais, microfuros em ligas aeroespaciais, indústria da fabricação de relógios e desenvolvimento de microagulhas, microdispositivos fluídicos, semicondutores, microcanais em dispositivos eletrônicos e furos para injeção de combustível em automóveis.

Há, portanto, demanda para desenvolvimento de métodos que apresentem repetibilidade e atendam faixas estreitas de tolerâncias geométricas e dimensionais de projeto, por meio da fabricação em microescala, promovendo o crescimento econômico assegurando uma melhor qualidade de vida da população. O motivo disto está relacionado à economia de energia e de recursos materiais bem como uma maior facilidade no controle do desperdício de matéria prima e da poluição, associados a um melhor aproveitamento de espaço físico em decorrência das

menores dimensões requeridas das estruturas maquinárias e a redução de custos de funcionamento do ciclo de produção.

Dentre os processos mecânicos de microusinagem destaca-se a microrretificação, principalmente como etapa de acabamento em superfícies pré-usinadas, e também na fabricação de micropinos e microcanais como partes integrantes de dispositivos mecânicos e sensores variados.

Diferentemente ao abordado em macroescala, com a redução diametral da ferramenta de corte, os parâmetros de corte como profundidade de corte e penetração de trabalho podem se apresentar na mesma ordem de grandeza da partícula abrasiva. Os diâmetros médios equivalentes dos abrasivos em processos de usinagem de precisão são tradicionalmente na faixa micrométrica (em torno de 100 μm), assim como os principais resultados de rugosidade que também se encontram na faixa micrométrica. Por outro lado, a fabricação de ultraprecisão busca acabamentos manométricos ($< 100 \text{ nm}$) com superfícies livres de danos críticos.

A necessidade por microferramentas abrasivas para microfabricação impulsionou o desenvolvimento de diferentes geometrias de ferramentas e tecnologias de retenção de abrasivos por meio de ligantes.

A importância em se atentar quanto às particularidades e limitações da diminuição diametral e qualidade das ferramentas e da fabricação em microescala, em que fatores como vibrações mecânica, rigidez das ferramentas, estrutura das máquinas, mecanismos de remoção de material e formação de cavaco se tornam ainda mais relevantes e determinantes no acabamento superficial das peças usinadas quando comparados à macroescala de trabalho são constantemente fruto de discussões em microusinagem.

Em paralelo à usinagem mecânica, outros métodos vêm sendo difundidos para a produção de microcomponentes e características micrométricas em materiais condutores de eletricidade. A utilização de diferentes fontes de energia voltadas principalmente para a remoção de material vem sendo amplamente empregadas na indústria automobilística e aeroespacial, com destaque para a microusinagem eletroquímica ou micro-ECM (*micro-Electrochemical Machining*).

Nos processos puramente eletroquímicos, a usinagem ocorre pela eletrólise do material base da peça, caracterizada por não envolver o contato mecânico entre os eletrodos peça e ferramenta de trabalho. Por este motivo, é muito utilizada por ser capaz de atuar na fabricação de peças e características em materiais de difícil usinagem, como cerâmicas e ligas de titânio.

Mais ainda, buscando vincular os benefícios entre as variadas tecnologias, a interação entre os diferentes processos de fabricação e fontes de energia culminou na origem dos

processos híbridos de usinagem, possibilitando o processamento de diferentes materiais e a obtenção de geometrias complexas com elevada precisão dimensional. Nesse campo, situa-se a retificação eletroquímica, a qual combina a ação abrasiva do rebolo considerando a associação dos graus de liberdade e cinemática de processo de uma ferramenta mecânica de corte atuando conjuntamente com a ação eletroquímica da usinagem eletroquímica para remoção de material.

Trabalhos envolvendo o hibridismo combinando características dos processos em escala micrométrica de trabalho, todavia, ainda são poucos encontrados na literatura, mostrando uma defasagem nessa área de estudo. No contexto descrito, esta pesquisa pretende acrescentar, no cenário da microusinagem e fabricação de ultraprecisão em microescala, uma análise no comportamento de ensaios de microrretificação realizados em peças preparadas mecanicamente comparativamente ao seu desenvolvimento em peças atacadas eletroquimicamente (indução à passivação superficial), neste segundo caso por combinar ações eletroquímicas e mecânicas, se enquadrando como um processo híbrido de fabricação, durante a investigação do acabamento em superfícies da liga Ti-6Al-4V e buscando atingir os seguintes objetivos.

Objetivo principal:

O presente trabalho tem como objetivo geral produzir peças com acabamentos nanométricos ($Ra < 100$ nm) por meio do hibridismo entre microrretificação e passivação eletroquímica da liga Ti-6Al-4V atenuando os danos críticos ao material.

Objetivos específicos:

- Projeto e montagem de processo híbrido de usinagem em minimáquina-ferramenta;
- Propor critérios de preparação superficial para processo de microrretificação;
- Microrretificação da liga Ti-6Al-4V (influências dos parâmetros V_s , ap e V_w);
- Avaliação do desempenho de microrrebolos comerciais;
- Avaliação do comportamento eletroquímico da liga Ti-6Al-4V;
- Desenvolvimento de passivação eletroquímica da liga Ti-6Al-4V;
- Caracterização da integridade estrutural e a relação G dos microrrebolos; e
- Caracterização da integridade superficial das peças usinadas por meio da medição de parâmetros de rugosidades (Ra , Rq , Rz , Rp , Rv , Rt), MEV e perfilometria 3D;

Justificativa:

O desenvolvimento de técnicas capazes de produzir microcomponentes ou microcaracterísticas de elevada qualidade superficial com parâmetros de rugosidade que atinjam escalas nanométricas de precisão, atendendo especificações únicas de projeto que possam envolver acoplamentos mecânicos ou funções específicas, e sejam livres de defeitos críticos estruturais tanto da superfície usinada quanto da ferramenta de corte utilizada, para que a aplicação de materiais de difícil usinagem, como as ligas de titânio, em especial a liga Ti-6Al-4V, uma das principais ligas utilizadas na fabricação de motores mecânicos na indústria aeronáutica, possa ser amplamente difundida, resultou na proposta desta pesquisa.

Originalidade:

Baseia-se na associação da eletroquímica como agente modificador superficial (passivação) com a remoção mecânica por microrretificação visando integridade superficial com acabamento nanométrico da liga Ti-6Al-4V. Esta pesquisa resultou em um depósito de patente de invenção.

Teses:

- 1) É possível associar a eletroquímica como agente modificador (passivador) de superfície para favorecer a microrretificação da liga Ti-6Al-4V?
- 2) É possível alcançar acabamento nanométrico ($R_a < 100$ nm) da liga Ti-6Al-4V por meio de processo híbrido de fabricação empregando abrasivos de dimensões micrométricas?
- 3) É possível controlar o acabamento de microcanais microrretificados?
- 4) Quais são os parâmetros de processo estatisticamente significativos?
- 5) Qual é o resultado comparativo entre microrretificação e microrretificação híbrida?

Esta tese conta com mais seis capítulos, descritos a seguir.

O capítulo II retrata a revisão bibliográfica necessária para o entendimento sobre o processo abrasivo e as particularidades relacionadas ao seu desenvolvimento em escala micrométrica de trabalho, assim como para a usinagem eletroquímica. São apresentados ainda os fundamentos teóricos e o estudo da arte quanto ao hibridismo entre a retificação/microrretificação e a eletroquímica, bem como as principais características quanto ao material investigado, a liga Ti-6Al-4V.

O capítulo III detalha os materiais e métodos utilizados para alcançar o objetivo proposto. Os projetos e fabricação de dispositivos mecânicos para adaptação da minimáquina aos ensaios planejados, os procedimentos e técnicas empregadas para avaliação do comportamento eletroquímico da liga e os planejamentos dos ensaios de usinagem realizados. Ao final, são abordados os métodos e equipamentos utilizados para análise quantitativa e qualitativa dos resultados.

O capítulo IV apresenta os resultados obtidos, as análises e as discussões com base no difundido pela literatura ao que tange os processos investigados, e a comparação dos resultados obtidos entre eles, em que são comentadas as dificuldades e desafios enfrentados durante o desenvolvimento da pesquisa.

No capítulo V são pontuadas as principais conclusões e propostas para trabalhos futuros.

No capítulo VI são listados os trabalhos citados ao longo do trabalho.

Por fim, o capítulo VII refere-se aos Apêndices.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os principais fundamentos teóricos para este trabalho pertinentes aos processos de microrretificação e características sobre a usinagem eletroquímica, bem como as considerações relacionadas ao hibridismo envolvendo a ação mecânica abrasiva e a eletroquímica, apresentando pesquisas desenvolvidas na área de estudo, e também informações e trabalhos realizados envolvendo o material investigado, a liga Ti-6Al-4V. O capítulo contempla 2.1 Microusinagem, 2.2 Microrretificação, 2.3 Usinagem eletroquímica, 2.4 O processo híbrido abrasivo-eletroquímico e 2.5 Material da peça: Titânio e suas ligas.

2.1 Microusinagem

O processo de usinagem desempenha um importante papel na manufatura dos componentes e dispositivos mecânicos, de modo que o desenvolvimento de sua capacidade na escala micrométrica de precisão tem sido cada vez mais aprimorado em concordância ao crescimento industrial na área de miniaturização (DORNFELD *et al.*, 2006). O conceito de microusinagem, entretanto, pode ter definições distintas.

Masuzawa (2000) conceitua a microusinagem como um método em que as dimensões das ferramentas utilizadas variam de 1 μm a 999 μm . Alting *et al.* (2003) caracterizam a microusinagem como processos que envolvem o desenvolvimento e a fabricação de peças cujas características funcionais ou pelo menos uma dimensão seja da ordem de micrometros. Camara *et al.* (2012) também avaliam a microusinagem a partir do tamanho da ferramenta, a qual deve estar entre 1 μm e 1000 μm para que o processo seja considerado micro, em que os autores

destacam que a condição mais importante da usinagem em microescala está no fato da ferramenta ter o raio de sua aresta de corte com dimensões semelhantes à da espessura de corte e da microestrutura do material. Segundo Rodrigues e Jasinevicius (2017), a definição de microusinagem deve considerar não apenas as dimensões nominais da peça ou da ferramenta, mas também os parâmetros de corte que afetam diretamente o mecanismo de remoção de material, como a profundidade de corte, a qual deve estar na faixa de 1 à 100 μm para se enquadrar como um processo em microescala.

De modo geral, a microusinagem consiste na fabricação de componentes miniaturizados com dimensões que variam entre dezenas de micrometros a alguns milímetros, conferindo formas livres tridimensionais à superfície dos materiais, que incluem ligas metálicas, compósitos, polímeros e materiais cerâmicos, por meio da utilização de ferramentas de corte miniaturizadas (CHAE *et al.*, 2006). Ainda, de acordo com os autores, durante o processo de remoção, em função do desenvolvimento de tecnologias avançadas acopladas à estrutura da máquina-ferramenta, permite o monitoramento da qualidade dos componentes produzidos, para que possíveis erros possam ser corrigidos antes que o mesmo seja finalizado.

A produção de uma ferramenta miniaturizada, todavia, apresenta-se como um desafio para o processo, em que uma geometria imprecisa e irregular produzida pode ofuscar os benefícios da microusinagem (DORNFELD *et al.*, 2006), demandando o emprego de processos capazes de fornecerem diâmetros menores que 1 mm, sem que seja perdida sua característica de corte. Apesar da inviabilidade em se obter arestas afiadas, de acordo com Piljek *et al.* (2014), geralmente, utiliza-se a microrretificação para a fabricação das microferramentas, e para o caso de geometrias complexas e diâmetros ainda menores (faixa de dezenas de nanômetros), a utilização de técnicas como eletroerosão a fio ou usinagem eletroquímica fazem-se necessária.

A dificuldade na produção de microferramentas também é abordada por Venkatesh *et al.* (2016), que ressaltam o emprego de processos não convencionais (consideram a utilização de diferentes fontes de energia como térmica, elétrica ou química, para remoção de material, sem fazer o uso de uma ferramenta, de geometria definida ou não, com aresta afiada) para tal finalidade.

Além da redução no diâmetro da ferramenta, Liu *et al.* (2004) afirmam haver particularidades na microusinagem, diferente da macrousinagem, que influenciam nos mecanismos fundamentais do processo e resultam em alterações na formação de cavacos, forças de corte, energia específica de corte (TAMINIAU, DAUTZENBERG; 1991), e na geração e subsequente definição da superfície usinada. Tais particularidades configuram o efeito escala.

Razali e Qin (2013) asseguram que deve ser limitado o quanto a usinagem possa ser reduzida, ressaltando que fatores como vibração, a compensação da ferramenta, temperatura, rigidez da ferramenta, estrutura da máquina e remoção de cavacos se tornam relevantes na microusinagem.

2.1.1 Efeito Escala

A compreensão do conceito de efeito escala pode ser alcançada ao analisar o modelo da Fig. 2.1, apresentado por Aramcharoen e Mativenga (2009), que representa o processo de usinagem idealizado por meio de uma ferramenta de corte com geometria definida, em que h indica a espessura do cavaco não deformado e r_e corresponde ao raio da aresta de corte. Na macroescala (Fig. 2.1a), a aresta de corte é assumida como perfeitamente afiada e o contato entre a ferramenta e o material da peça de trabalho ao longo da superfície de folga é negligenciado, sendo o material removido predominantemente pela força de cisalhamento mecânico devido à interação entre a peça e a superfície de saída da ferramenta, formando assim o cavaco. O ângulo de saída da ferramenta (α) é positivo na Fig 2.1a, facilitando o corte, e negativo na Fig 2.1b considerando a formação do cavaco sobre a aresta de corte da ferramenta, dificultando a remoção de material (BISSACO *et al.*, 2005).

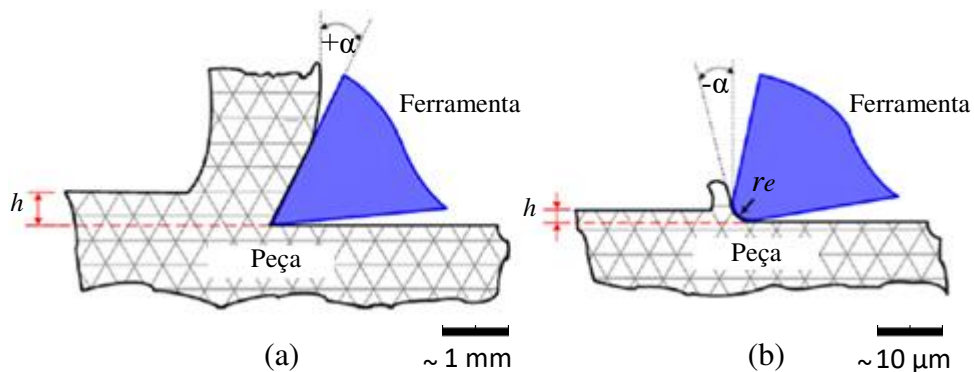


Figura 2.1 - Esquema da aresta de corte em (a) escala macrométrica e (b) escala micrométrica (adaptado de ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

Na microusinagem (Fig. 2.1b), entretanto, a dificuldade na fabricação das ferramentas com diâmetros inferiores a 1 mm, impossibilita a consideração de uma aresta de corte perfeitamente afiada, de modo que o seu raio se torna significativo em relação à espessura do material a ser removido, influenciando no mecanismo de remoção. Quando o tamanho do grão do material cortado é comparável à espessura do cavaco não deformado, a aresta de corte arredondada tende a cortar (situação ideal), fraturar ou arrancar um único grão

(ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009), configurando-se um ângulo negativo de saída α , o que afeta significativamente a magnitude (aumento) das forças de sulcamento e de cisalhamento (CHAE *et al.*, 2006). Deste modo, um volume relativamente grande de material deve se tornar totalmente plástico para que haja a remoção de uma quantidade relativamente pequena de material na forma de cavaco, resultando em um aumento expressivo na energia específica de corte (δ), conforme obtido em Lucca *et al.* (1991), sendo esta a energia necessária para remover uma unidade de volume de material por unidade de tempo (SHAW, 1995).

Análogo ao conceito de energia, está a pressão específica de corte (k_s), a qual, segundo Ferraresi (1970), pode ser definida pela razão entre a força de corte e a área da seção de corte, e se encontra relacionada a fatores como material da peça, geometria da ferramenta e os parâmetros de corte do processo. Assim, o aumento não-linear experimentado pelas grandezas de energia ou pressão específicas para operações com espessura de cavaco não deformado extremamente reduzidas (ordem micrométrica) ficou conhecido na literatura como efeito escala (LIU; MELKOTE, 2007; DING *et al.*, 2011; ANAND *et al.*, 2014). Segundo Liu *et al.* (2004), o efeito escala traz desafios ao processo por meio do impacto significativo nas forças de corte, estabilidade do processo e no acabamento superficial das peças.

De modo a quantificar as diferenças encontradas entre os processos em macro e microescala em termos de δ , Oliveira *et al.* (2013) investigaram a operação de fresamento em superfícies de aço ABNT 1045, considerando a variação do avanço por dente f_z e da profundidade de corte a_p em cada condição C de usinagem, a uma velocidade de corte constante de 60 m/min. Foram realizados ensaios de fresamento em macroescala (C1 – f_z 0,010 mm/dente e a_p 0,160 mm; C2 – f_z 0,020 mm/dente e a_p 0,160 mm; C3 – f_z 0,010 mm/dente e a_p 0,320 mm; C4 – f_z 0,020 mm/dente e a_p 0,320 mm) e microfresamento (C1 – f_z 0,005 mm/dente e a_p 0,080 mm; C2 – f_z 0,010 mm/dente e a_p 0,080 mm; C3 – f_z 0,005 mm/dente e a_p 0,160 mm; C4 – f_z 0,010 mm/dente e a_p 0,160 mm), em que foram adotadas fresas de diâmetro 2,0 mm e 0,8 mm, respectivamente. Na Figura 2.2 são apresentados os resultados encontrados.

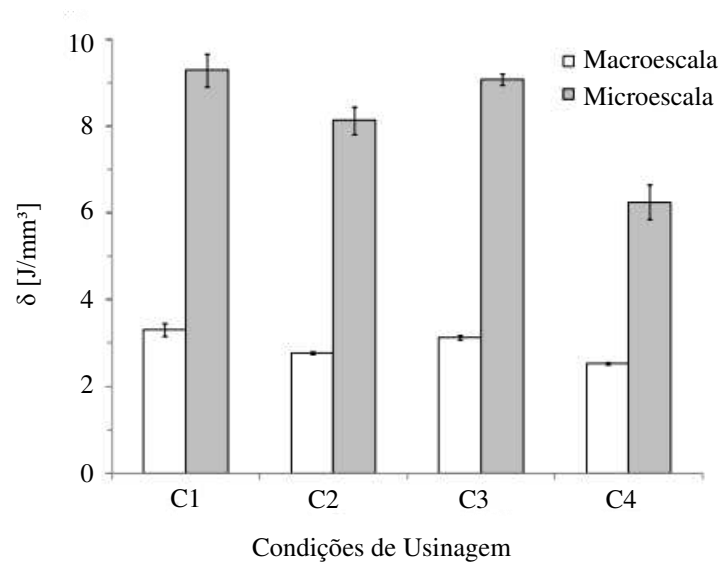


Figura 2.2 – Efeito das condições de fresamento e da escala da usinagem sobre a energia específica de corte (adaptado de OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Os autores concluíram que os maiores valores de δ foram obtidos durante os ensaios de microusinagem, alcançando até três vezes os resultados encontrados no fresamento em macroescala. A justificativa foi condicionada ao efeito escala, em que a formação de cavacos é dificultada pela maior pressão do raio da aresta de corte da ferramenta sobre o material da peça, uma vez que esse raio se torna significativo em relação à espessura de corte nos processos em microescala, até ser atingida uma espessura mínima do cavaco e promover a remoção de material. Em Oliveira *et al.* (2015), foram também avaliados os valores de força específica de corte para o mesmo material, em que todos os resultados foram maiores também durante os testes em microescala ao adotarem os menores valores de f_z e a_p , em que as forças de sulcamento (deformação plástica) e cisalhamento influenciaram significativamente esses maiores valores encontrados.

Por outro lado, Lucca e Seo (1993) avaliaram a influência da utilização de ferramentas novas e gastas no fresamento de ultraprecisão (técnica *flycutting*) em peças da liga de telúrio e cobre nos valores de δ e h . Notou-se que para ambos os casos, o comportamento observado para a energia específica de corte foi o mesmo, em que também foi identificado um crescimento à medida em que são considerados menores valores de h e conseqüentemente de a_p , porém de menor magnitude ao considerar as ferramentas novas. Os autores ressaltaram ainda o aumento na magnitude do ângulo de saída negativo ao serem adotados menores valores de a_p .

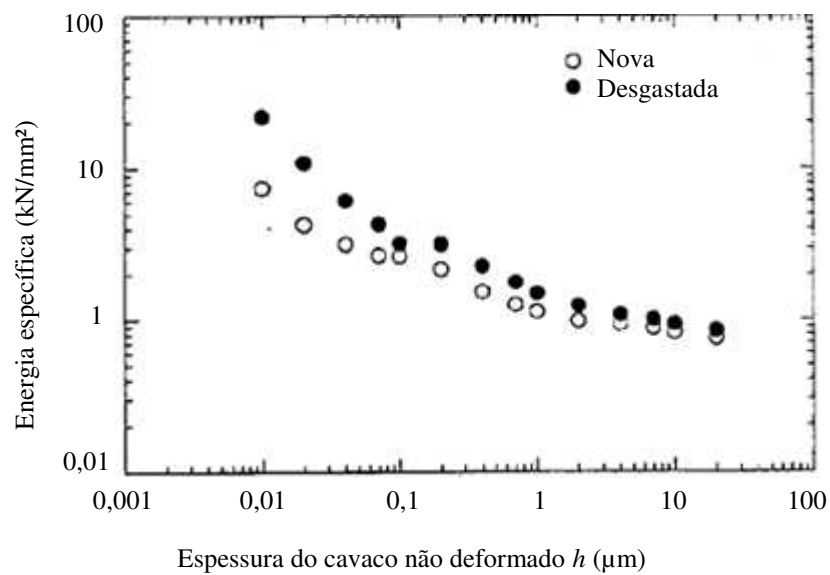


Figura 2.3 - Relação entre a energia específica de corte e a espessura do cavaco não deformado para ferramentas de diamante em condição nova e gasta (adaptado de LUCCA e SEO, 1993).

No caso dos processos de microusinagem por meio de ferramentas com geometria não definida, como na microrretificação, a influência do efeito escala assemelha-se ao comportamento abordado frente ao raio da aresta de corte do abrasivo. Nas Figuras 2.4a e 2.4b estão representadas esquematicamente a usinagem analisando a ação de uma única partícula abrasiva durante a retificação macrométrica e em microescala, respectivamente.

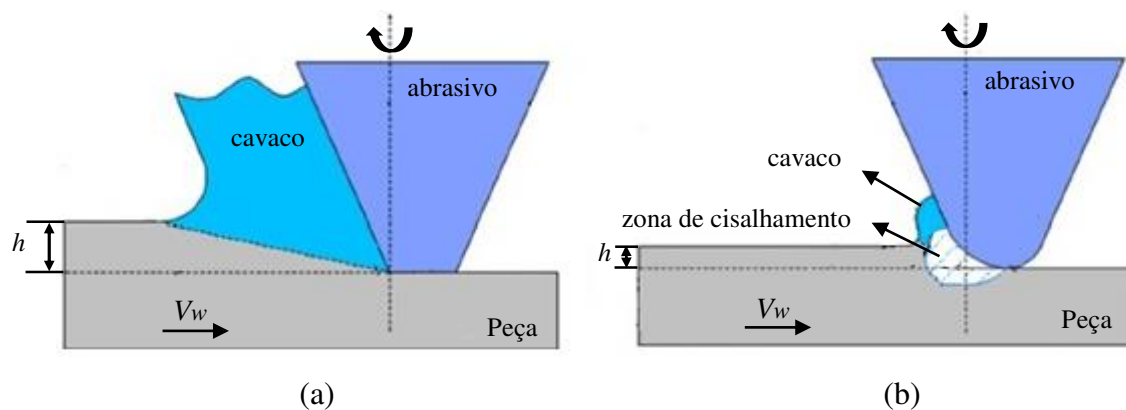


Figura 2.4 - Esquema do processo de remoção de material em (a) na retificação em macroescala e em (b) na microrretificação (adaptado de YA-DONG *et al.*, 2018).

Embora a granulometria dos abrasivos possa ser a mesma e o ângulo de saída efetivo negativo em ambos os processos, na macrorretificação, com a utilização de rebolos com diâmetros consideravelmente maiores que 1 mm, despreza-se um possível arredondamento da

aresta de corte do abrasivo em função da maior dimensão de h . Com a redução no diâmetro dos rebolos, com possível redução nas taxas de remoção de material e temperaturas de trabalho, aliadas a menor rigidez mecânica da ferramenta, o raio da aresta de corte do abrasivo passa a ser significativo comparativamente à espessura do material a ser removido e a aresta é assumida como arredondada, em que a razão entre h e o raio decresce. A diminuição do ângulo de saída efetivo associado ao arredondamento das arestas no rebolo durante o processo em microescala, afetando sua capacidade de corte, são responsáveis por elevar a energia específica de corte, característico do efeito escala (YA-DONG *et al.*, 2018).

Pratap *et al.* (2019) ressaltam que somado a esse fator, também devem ser consideradas as propriedades mecânicas do material bem como sua estrutura granular (no caso dos policristalinos), uma vez que as partículas abrasivas podem arrancar material ultrapassando as fronteiras dos grãos da peça, induzindo ao sulcamento e ao corte transgranular, resultando em maiores forças de corte.

2.1.2. Formação de cavaco na microusinagem

De acordo com Dornfeld *et al.* (2006), dois principais aspectos devem ser considerados em relação ao efeito escala, o primeiro quando o valor de ap se aproxima da mesma ordem de grandeza do raio da aresta de corte da ferramenta ou ainda quando a microestrutura do material da peça influencia (positivamente ou negativamente) no mecanismo de remoção de material. Dependendo do efeito, maiores deflexões da ferramenta, desgaste e risco de falha catastrófica durante a formação de cavaco podem ser observadas (BISSACCO *et al.*, 2005).

A avaliação da influência da microestrutura durante o microfresamento em amostras da liga Ti-6Al-4V foi realizada por Ahmadi *et al.* (2018), em que diferentes tamanhos de grão foram obtidos por meio de tratamento térmico da liga. Para tanto, consideraram a utilização de uma microfresa de 400 μm de diâmetro, a uma velocidade de corte de 35 m/min, f_z de 1,5 μm e ap igual a 30 μm , produzindo-se microcanais com 10 mm de comprimento. Os autores notaram que as amostras com grãos mais finos demandaram maiores forças de corte, aproximadamente 60 % a mais quando comparado às amostras com grão mais largos, entretanto, as superfícies usinadas resultaram em um menor valor de rugosidade superficial.

De acordo com Chae *et al.* (2006) e Aramcharoen e Mativenga (2009), na microusinagem a remoção de material e a conseqüente formação de cavaco somente ocorre quando ap ou f_z selecionados resultam em uma espessura de cavaco não deformado (h) superior a um determinado valor, determinado como espessura mínima de cavaco ($h_{\text{mín}}$). Na Figura 2.5 são

apresentadas diferentes situações relativas à geração de cavaco, em que V_w representa a velocidade de avanço da ferramenta. Quando a espessura do cavaco não deformado é menor do que a espessura mínima crítica do cavaco, como mostrado na Fig. 2.5a, ocorre preferencialmente deformação elástica do material da peça e não há remoção de material (nenhum cavaco é formado).

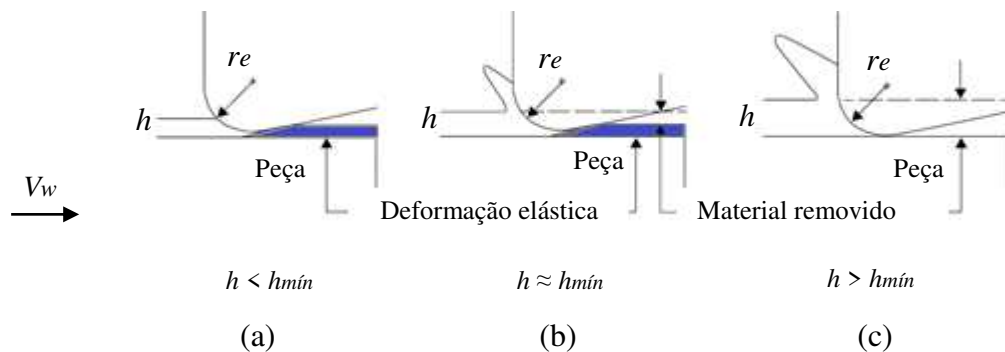


Figura 2.5 - Representação esquemática do efeito da espessura mínima de cavaco (adaptado de CHAE *et al.*, 2006).

À medida que a espessura do cavaco não deformado se aproxima da espessura mínima do cavaco, os cavacos começam a ser formados pelo cisalhamento do material, com alguma deformação elástica ainda ocorrendo, como ilustrado na Fig. 2.5b. Como resultado, a profundidade removida da peça de trabalho é menor que a profundidade desejada, podendo haver remoção de material, mas não de forma estável. No entanto, quando a espessura do cavaco não deformado aumenta além da espessura mínima do cavaco, o fenômeno de deformação elástica diminui significativamente, com restituição elástica praticamente desprezível, e material passa então a ser removido na forma de cavaco (situação desejada), conforme apresentado na Fig. 2.5c (CHAE *et al.*, 2006).

A formação de cavacos durante a microrretificação em superligas monocristalinas à base de níquel foi investigada por Zhou *et al.* (2019). Os autores explicam que a natureza da formação de cavaco nos processos abrasivos consiste no esmagamento somado ao atrito de contato por parte das arestas de corte das partículas abrasivas com a superfície de trabalho, promovendo cisalhamento e deslizamento de material. A contínua atuação de compressão imposta pelos abrasivos intensifica a formação de discordâncias na microestrutura que se deslocam ao longo do plano de deslizamento, ocasionando deformação plástica do material na região de cisalhamento e promovendo a sua ruptura em porções que são removidas na forma de

cavaco. Para o caso da superliga, observaram que quando a energia de deformação na zona de cisalhamento atingia o limite de resistência da peça, um abrupto cisalhamento parcial ocorria, resultado de um desequilíbrio entre a atuação do abrasivo e o material na zona de cisalhamento. Com a continuação da microrretificação e aumento das forças de corte, a unidade de cavaco foi afetada pelo corte adiabático e amolecimento térmico, a qual aliada à deformação plástica sofrida pelo material, resultaram na fabricação de cavacos segmentados.

2.1.3 Máquinas-ferramentas

De acordo com Huo *et al.* (2009), componentes ou dispositivos fabricados por microusinagem devem obedecer determinados requisitos de projeto em etapa final como elevada precisão dimensional, em que são tipicamente impostos valores próximos de 1 μm , e estreitas tolerâncias geométricas, as quais podem atingir 50 nm. Em virtude disso, menores rugosidades superficiais podem ser obtidas, alcançando valores de Ra na faixa entre 10 nm a 50 nm. Os autores destacam a necessidade do aprimoramento das máquinas-ferramentas utilizadas, para atender as necessidades impostas pelas indústrias como aeronáutica, eletrônica e médica, demandando estruturas rígidas e sistemas de controle e monitoramento de processo.

Basicamente, uma máquina-ferramenta de ultraprecisão possui cinco subsistemas principais, em que se incluem a estrutura mecânica de sustentação, o cabeçote e o mecanismo de acionamento, um sistema de controle numérico, sensores para medição de posição (direta ou indireta) e um sistema de inspeção e monitoramento em processo, o qual deve ser capaz de detectar possíveis fontes de erro ainda durante a produção, como deformações térmicas, desgaste e quebra de ferramenta, aumento da força de corte. Esses subsistemas são responsáveis por determinar o desempenho da máquina-ferramenta de maneira geral (SUN, CHENG; 2015).

Piljek *et al.* (2014) explicam que o controle numérico se faz necessário para que a ferramenta efetue movimentos suaves sem provocar mudanças significativas no avanço, garantindo a confiabilidade e estabilidade do processo.

Para manter uma produtividade aceitável em compensação à redução no diâmetro da ferramenta, o que implicaria em menores taxas de remoção de material, Chae *et al.* (2006) e Piljek *et al.* (2014) destacam que os processos em microusinagem, por exemplo como o microfresamento e a microrretificação, devem trabalhar com cabeçotes capazes de atingir rotações mais elevadas. Os autores ressaltam que valores na faixa de 140 000 rpm a 200 000 rpm são comumente utilizados, podendo até mesmo chegar a 1 000 000 rpm, em contrapartida aos cabeçotes tradicionalmente utilizados na macrousinagem, em que usualmente

são selecionadas rotações em torno de 10 000 rpm, e entre 15 000 rpm a 50 000 rpm em máquinas projetadas para *High Speed Machining* (PASKO *et al.*, 2002).

Frequentemente, as pesquisas experimentais encontradas na literatura referente à microusinagem são conduzidas em máquinas-ferramentas de ultraprecisão com dimensões macrométricas comerciais ou em máquinas-ferramentas especialmente projetadas pelos pesquisadores (DORNFELD *et al.*, 2006). Ainda que possam apresentar sistemas eficientes de amortecimento e monitoramento, as maiores dimensões estruturais das máquinas-ferramentas comerciais de ultraprecisão e a necessidade em se manter o ambiente livre de possíveis influentes perturbações externas, resultam em custos extras para a fabricação dos microcomponentes ou até mesmo na inviabilidade de atendimento das estreitas tolerâncias dimensionais e geométricas (CHAE *et al.*, 2006).

Deste modo, o desenvolvimento de máquinas miniaturizadas e centros de usinagem com escalas reduzidas tem sido aperfeiçoado, possibilitando a execução de diferentes etapas de fabricação em um mesmo equipamento. Como vantagens, incluem-se a portabilidade e os menores gastos econômicos em relação a espaço requerido e consumo energético (PILJEK *et al.*, 2014). Okazaki *et al.* (2004) ainda citam a diminuição na amplitude das vibrações mecânicas e dos erros geométricos e a maior facilidade no controle dos poluentes gerados, conduzindo a uma linha de produção mais favorável economicamente.

No caso da microrretificação, destacam-se as retificadoras de ultraprecisão e as microrretificadoras, demandando configurações multi-eixo para a fabricação de superfícies complexas com características micrométricas (UHLMANN *et al.*, 2016). De acordo com Brinksmeier *et al.* (2010), essas máquinas-ferramentas devem apresentar precisão e suavidade de movimentação dos eixos, ser livre de vibração e folga excessivas, e terem um controle numérico computadorizado. Uhlmann *et al.* (2016) ressaltam ainda a necessidade de locação em um ambiente isolado, de modo que dispositivos metrológicos possam ser anexados na estrutura para verificação da qualidade superficial e geométrica das superfícies usinadas.

Para exemplificação de pesquisas envolvendo o projeto de máquinas-ferramenta para ensaios de microusinagem, se encontram os estudos de Bang *et al.* (2004) e Aurich *et al.* (2015). No primeiro, uma microfresadora multi-eixos, de tamanho compacto (300 mm de altura) e baixo custo (cerca de 1/10 do custo de fresadoras de precisão no mercado) foi confeccionada para a fabricação de sistemas térmicos compostos por microbombas e microturbinas. A minimáquina, cujas estruturas real e projetada são exibidas na Fig. 2.6, possui um sistema de

avanço composto pelos eixos X, Y e Z, de movimentação linear, e dois eixos rotativos de precisão (eixos A e C), com velocidade do eixo-árvore do na faixa de 20 000 rpm a 30 000 rpm.

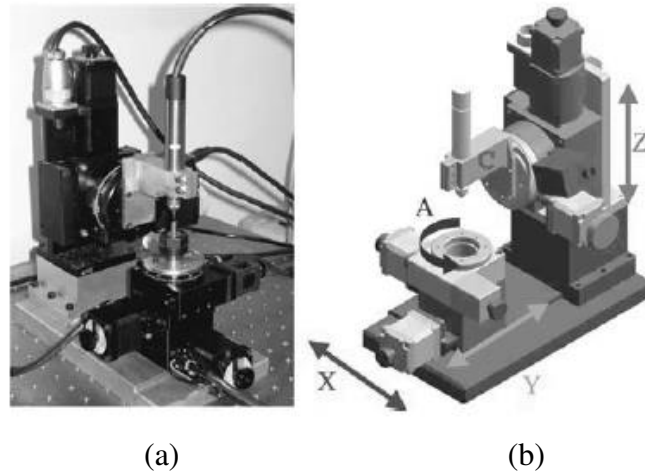


Figura 2.6 - Imagens em situação (a) real e (b) de projeto de uma microfresadora 5 eixos (BANG *et al.*, 2004).

No segundo, um Centro de Nanorretificação (NGC - *Nano Grinding Center*) foi desenvolvido, cujo esquema é mostrado na Fig. 2.7, o qual combina diferentes módulos intercambiáveis (1, 2, 3, 4 e 5) para o controle, monitoramento e fabricação de ferramentas e peças. O NGC possui dimensões próximas de 900 mm × 600 mm × 600 mm, e um cabeçote com rotações que variam entre 15 000 rpm a 160 000 rpm, de modo que os módulos são montados na base da máquina para auxiliar na produção e posterior utilização da ferramenta durante os ensaios, a qual pode apresentar diâmetro mínimo de 4 μm .

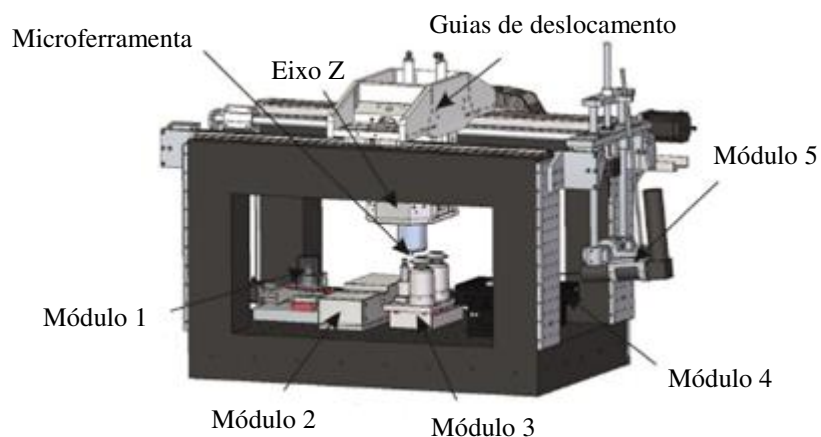


Figura 2.7 - Centro de nanorretificação (adaptado de AURICH *et al.*, 2015).

2.2 Microrretificação

A fabricação de peças e componentes com precisão dimensional por meio da utilização de um processo abrasivo pode ser uma tarefa complicada devido à sua natureza complexa e não determinística. Nesse contexto, a retificação de ultraprecisão (UP) surge viabilizando a produção de peças com elevado acabamento e integridade superficial, e precisão de forma, atuando para a remoção de materiais de difícil usinagem, como cerâmicas, vidros e aços endurecidos, empregando *ap* na faixa nanométrica, pequenas taxas de remoção e velocidades de corte de até 30 m/s, podendo ser aplicada por exemplo na fabricação de moldes para a replicação de elementos ópticos (BRINSKMEIER *et al.*, 2010).

Brinksmeier *et al.* (2010) ainda estabelecem pré-requisitos que possam classificar um processo de retificação como de ultraprecisão, em que se destacam a utilização de abrasivos fixos, o contato intermitente da ferramenta com a superfície da peça e a capacidade em fornecer, não exclusivamente, superfícies com acabamento adequado às aplicações ópticas, isto é, apresentar uma rugosidade média quadrática Sq menor que $\lambda/100$, sendo λ o comprimento de onda eletromagnética, e uma zona subsuperficial livre de danos para evitar o espalhamento de luz ou formação de trincas. Ainda, intrinsecamente ao conceito de retificação de ultraprecisão, está o seu caráter determinístico, ou seja, ser capaz de em uma única etapa de usinagem, alcançar os valores de rugosidade e tolerâncias geométricas de projeto, sem a necessidade de operações adicionais. Os autores afirmam a dificuldade em cumprir tais particularidades e definem a retificação UP como um processo que se aproxima ou visa atingir os pré-requisitos.

Enquadrando-se como um processo que propende à retificação de ultraprecisão, se encontra a microrretificação, um processo abrasivo de microusinagem utilizado principalmente para a fabricação e acabamento de características micrométricas em peças de materiais frágeis e de difícil usinagem, como vidro e cerâmica, empregando-se ferramentas com diâmetros menores que 1 mm e abrasivos de diamante ou CBN (PRATAP *et al.*, 2019). Segundo Miyashita (1985), na microrretificação são comumente adotados valores de taxa específica de remoção de material TRM' na ordem de 0,1 mm³/mm·s a 0,001 mm³/mm·s e dimensões das partículas abrasivas d_g que alcançam escalas nanométricas, conforme especificado na Fig. 2.8.

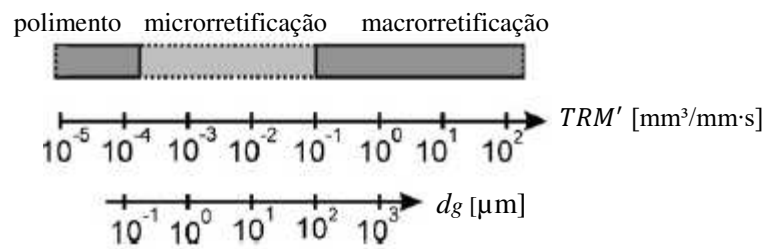


Figura 2.8 - Classificação da microrretificação com base na taxa de remoção de material e no tamanho do abrasivo (adaptado de MIYASHITA, 1985 *apud* BRINSKMEIER *et al.*, 2010).

Embora compartilhe aspectos semelhantes à macrorretificação, como a aleatoriedade na distribuição dos abrasivos ao longo do perímetro da ferramenta de corte e o método de usinagem por abrasão a 2 corpos (abrasivos fixos à estrutura base da ferramenta), na microescala, a remoção de material sofre influência do efeito escala, modificando as interações mecânicas e térmicas entre a partícula abrasiva e a superfície da peça (PARK; LIANG, 2008). Além da significativa redução no diâmetro da ferramenta, ocasionando uma menor rigidez mecânica estática e dinâmica, de acordo com Park (2008), a relevância de efeitos, como deformação do rebolo e força de sulcamento, não significantes na retificação macrométrica, se tornam relevantes durante a microrretificação. Na Tabela 2.1 são pontuadas algumas das diferenças entre a retificação em macroescala e microescala.

Tabela 2.1 - Diferenças entre a retificação macro e micrométrica (adaptado de PARK, 2008).

	Retificação macrométrica	Microrretificação
Razão entre profundidade de corte e raio do abrasivo	50 a 100	0,1 a 1
Efeito do sulcamento	Não significativo (~ 0 %)	Significativo (~ 20 % a 30 %)
Atrito na interface	Modelo de Coulomb	Modelo de Coulomb + Atrito devido ao sulcamento
Diâmetro do rebolo	6 mm a 1 500 mm	4 μm a 1,5 mm
Taxa específica de remoção de material	superior a $10^{-1} \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$	$10^{-1} \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ a $10^{-3} \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$

Nas Figuras 2.9a e 2.9b são exibidas representações esquemáticas de diferentes operações de microrretificação, plana tangencial e plana frontal, respectivamente, em fase de remoção de material, sendo n_s correspondente à rotação associada à V_s (velocidade de corte) e V_w à velocidade de avanço.

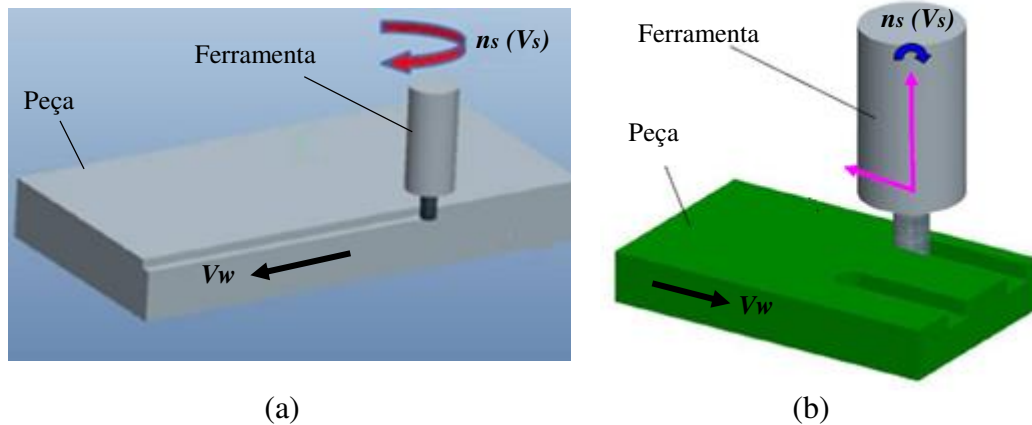


Figura 2.9 - Esquema do processo de remoção de material durante as operações de microrretificação em (a) plana tangencial (adaptado de WEN; GONG, 2017) e em (b) plana frontal (adaptado de CHENG; GONG, 2014).

Pratap *et al.* (2016) destacam que uma das principais vantagens do processo consiste na minimização da formação de rebarbas, a qual é responsável por prejudicar a qualidade do acabamento na microusinagem, tipicamente no microfresamento, conforme abordado nos trabalhos de Ziberov *et al.* (2016), Silva e Da Silva (2019), de Oliveira (2019), Gomes *et al.* (2020) e dos Santos (2020). Outra vantagem está na obtenção de menores forças de corte durante os ensaios em virtude da menor remoção de material individual de cada partícula abrasiva somado à adoção de maiores velocidades de corte em comparação ao microfresamento. Perveen *et al.* (2012) ressaltam o emprego da microrretificação na fabricação de microcanais para dispositivos microfluídicos, utilizados em sensores de sistemas microeletromecânicos (MEMS) biológicos, em que os autores investigaram a usinagem em três diferentes tipos de vidro (BK7, Quartzo e N-SF14), objetivando superfícies com menor rugosidade superficial.

Alguns exemplos de características produzidas por meio da microrretificação são mostrados nas Figs 2.10a e 2.10b, respectivamente abordando um dispositivo microfluídico, fabricado em vidro, empregado em reatores miniaturizados, e a usinagem de um microcanal em silício, material este utilizado na fabricação de células fotovoltaicas e de *chips* para a indústria eletrônica.

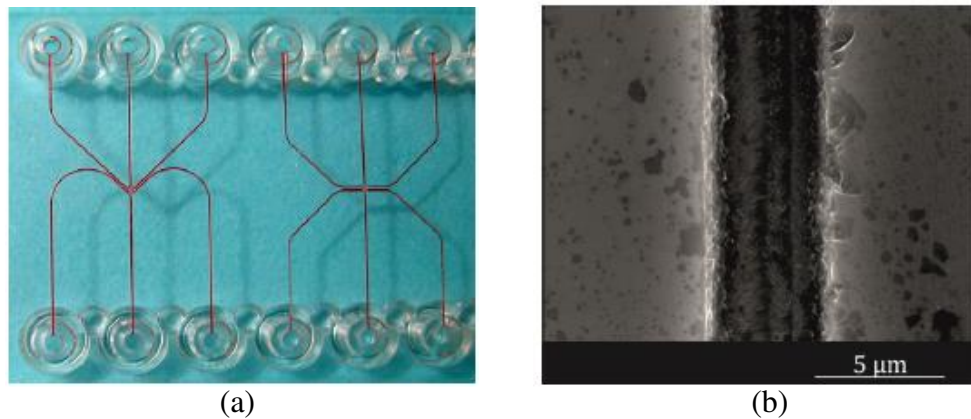


Figura 2.10 - Exemplos de componentes fabricados por microrretificação em (a) dispositivo microfluídico (AURICH *et al.*, 2009) e em (b) microcanal em silício (AURICH *et al.*, 2015).

2.2.1 Rebolos

Na retificação, os rebolos são utilizados como ferramentas de corte, possuindo uma estrutura que consiste basicamente da união de partículas abrasivas por meio de um ligante, em que há a presença de poros (região vazia) entre os abrasivos responsável por facilitar a remoção de cavaco e auxiliar na refrigeração. Geralmente, os abrasivos estão distribuídos aleatoriamente aderidos ao longo do perímetro do rebole, de modo que o seu desempenho está diretamente relacionado com os principais elementos que o definem, no caso a estrutura e o material para fabricação, o tamanho do abrasivo selecionado e as suas propriedades mecânicas e o ligante (MALKIN; GUO, 2008).

De acordo com a norma norte-americana ANSI *Standard B 74.12* (1977), por meio da grandeza *mesh*, as partículas abrasivas podem ser classificadas de acordo com suas dimensões, a qual se refere à granulometria do rebole, que variam de muito grossos (6 *mesh* a 12 *mesh*) a finíssimos (400 *mesh* a 1 200 *mesh*). Segundo Klocke (2009), o abrasivo deve possuir dureza a quente para garantir e facilitar a formação do cavaco, mantendo a aresta de corte afiada. Além disso, apresentar resistência térmica para suportar as temperaturas de usinagem, tenacidade suficiente para suportar variações sucessivas de tensão mecânica e resistência química para inibir reações químicas quando em contato com o ar, fluido de corte ou superfície da peça.

Na Tabela 2.2 são apresentadas propriedades de alguns materiais de partículas abrasivas, em que o diamante e o CBN, conhecidos como superabrasivos, são os mais frequentemente utilizados em processos de retificação UP (BRINKSMEIER *et al.*, 2010), objetivando reduzir o desgaste da ferramenta e aumentar sua vida.

Tabela 2.2 - Propriedades de alguns materiais abrasivos (adaptado de MALKIN; GUO, 2008).

Material	Estrutura cristalina	Densidade (g/cm ³)	Dureza Knoop (GPa)
Diamante	Cúbica	3,52	78,5
CBN	Cúbica	3,48	46,1
SiC (Carbeto de Silício)	Hexagonal	3,22	23,5
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	Hexagonal	3,98	20,6

Marinescu *et al.* (2007), Fiocchi (2014), Fiocchi *et al.* (2015) e Fiocchi *et al.* (2016) ressaltam ainda a característica de friabilidade dos abrasivos, responsável pela autoafiação da ferramenta por meio da fratura do abrasivo formando novas arestas de corte. Entretanto, não são todos os abrasivos que são friáveis. A friabilidade depende do material do abrasivo e aplicação, influenciando a agressividade do rebolo, reestabelecimento do corte, vida e desempenho global do processo de retificação (FIOCCHI, 2014).

Um ligante é responsável pela adesão da partícula abrasiva à ferramenta de corte, que atua como um sistema de fixação, retendo o abrasivo. Tradicionalmente, segundo Brinskmeier *et al.* (2010) e Wenfeng *et al.* (2017), os tipos de ligantes mais utilizados são os metálicos, resinóides e vitrificados. O ligante metálico eletrodepositado destaca-se na fabricação dos microrrebolos por ancorar uma única camada (monocamada) de superabrasivos ao substrato metálico da ferramenta (WENFENG *et al.*, 2017), conforme representado na Fig. 2.10. Um dos principais ligantes é o níquel, com o objetivo de aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão, características do material, protegendo o metal base (ZANGARI, 2018).

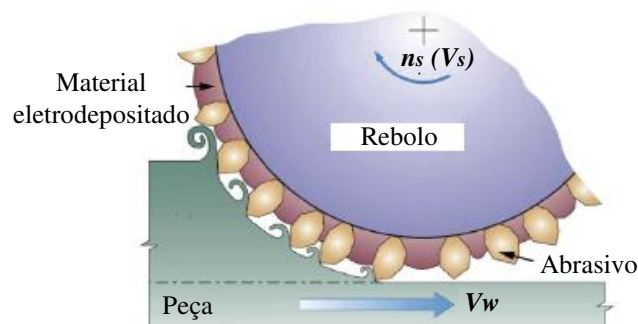


Figura 2.11 - Representação esquemática de um rebolo monocamada com ligante eletrodepositado (adaptado de WENFENG *et al.*, 2017).

Wenfeng *et al.* (2017) afirmam que as vantagens da utilização do modelo de monocamada com abrasivos eletrodepositados consiste na possibilidade de se trabalhar em maiores taxas de remoção de material devido à maior protrusão das partículas abrasivas, melhor retenção dos abrasivos por longos períodos, aumento da condutividade térmica (ZANGARI, 2018) e redução significativa na necessidade de preparação da ferramenta para usinar.

Para iniciar e manter as condições favoráveis de remoção na retificação, a ferramenta deve estar agressiva ou afiada. Existem diversas operações com a finalidade de preparar o rebolo ou reestabelecer as condições de corte, sendo elas o perfilamento, o avivamento e a dressagem. Na primeira, objetiva-se adquirir uma concentricidade entre a superfície de trabalho e o eixo de rotação do rebolo, possibilitando a geração de um perfil específico, atuando também para a remoção de partículas aderidas na área de corte da ferramenta, renovando a camada do abrasivo desgastada. Já o avivamento é responsável por uma maior exposição das partículas abrasivas por meio da remoção do ligante, ao passo que a dressagem consiste em uma operação mais completa, que pode incluir as operações de perfilamento e/ou avivamento, de modo a reafiar o rebolo para que seja alcançado o melhor desempenho da usinagem (KÖNIG, 1980; OLIVEIRA, 1988; OLIVEIRA, 1989; FIOCCHI, 2010; FIOCCHI, 2014).

Estudos recentes sobre microrretificação abrangem diferentes geometrias de microrrebolos, com diâmetros variados, em que são considerados formatos de pontas montadas, sendo os abrasivos eletrodepositados ou soldados ao redor da ponta. Como exemplos, encontram-se os trabalhos de Cheng e Gong (2014) e Aurich *et al.* (2015). No primeiro, os autores investigaram a microrretificação em chapas de silício monocristalino por meio de pontas montadas com abrasivos de diamante eletrodepositados granulometria 500 *mesh* e diâmetro igual a 600 μm . No segundo, foram avaliados os mecanismos para fabricação dessas pontas/ferramentas, em que os pesquisadores conseguiram obter diâmetros na ordem de 4 μm utilizando-se de partículas abrasivas de diamante com dimensões de 0,1 μm a 0,2 μm . Imagens em MEV das ferramentas abordadas em cada trabalho são apresentadas nas Fig. 2.12a e 2.12b, respectivamente.

A fabricação de pontas diamantadas também foi abordada no trabalho de Park *et al.* (2010), realizada quimicamente pela deposição de um ligante conforme esquema da Fig. 2.12a.

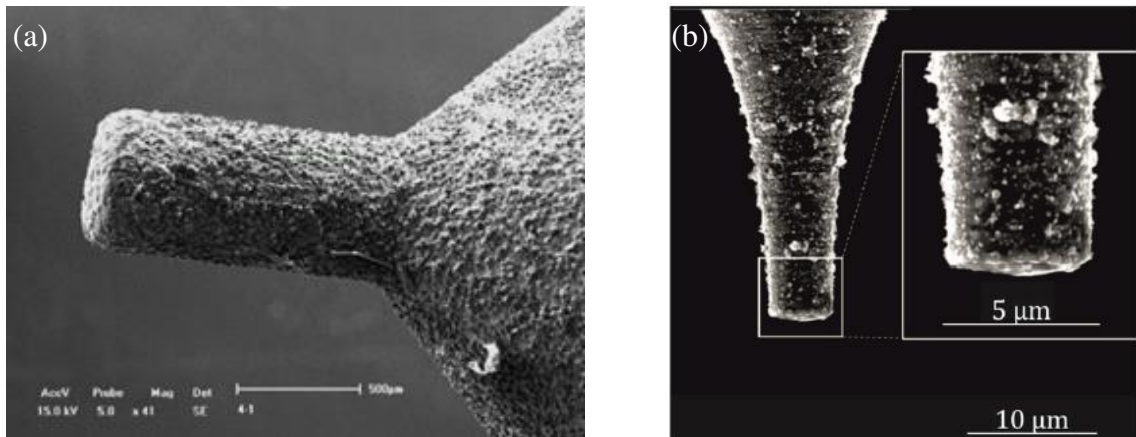


Figura 2.12 - Exemplos de microrrebolos com abrasivos de diamante e diâmetro igual a (a) 600 μm (CHENG; GONG, 2014) e (b) 4 μm (AURICH *et al.*, 2015).

Park *et al.* consideraram três faixas de dimensões de abrasivos de diamante, 0,5 μm a 2 μm , 2 μm a 4 μm e 5 μm a 10 μm , os quais foram adicionados à uma solução de níquel mantida em agitação para que houvesse uma distribuição uniforme das partículas sobre a haste metálica de diâmetro aproximado igual a 100 μm . Os microrrebolos com granulometria mais fina e mais grossa produzidos são mostrados na Fig. 2.13b e 2.13c, respectivamente.

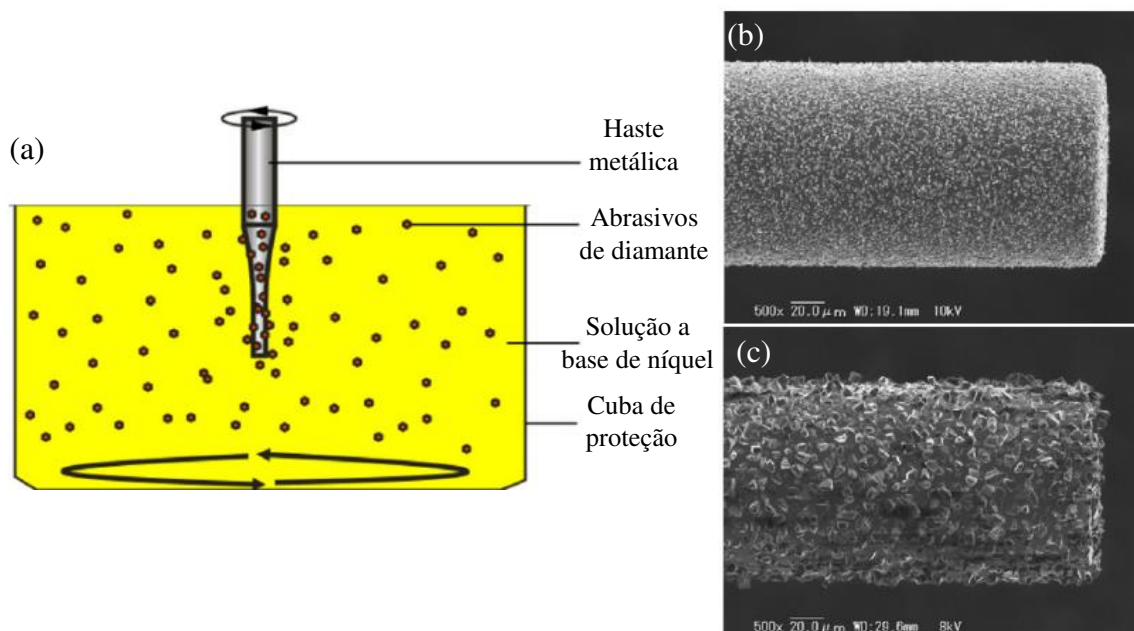


Figura 2.13 – Em (a) esquema do processo de fabricação de microferramentas abrasivas, em (b) ponta diamantada produzida com abrasivos de 0,5 μm a 2 μm e em (c) ponta diamantada produzida com abrasivos de 5 μm a 10 μm (adaptado de PARK *et al.*, 2010).

Em seguida, os autores investigaram a variação dos parâmetros de corte em ensaios de microrretificação que fornecessem uma maior vida da ferramenta, adotando-se V_s (entre os valores de 1,88 m/min a 18,8 m/min) e V_w (0,2 mm/min a 3,6 mm/min), e encontraram uma relação direta entre o crescimento da dimensão do abrasivo com a vida do microrrebolo. A melhor condição foi obtida com a utilização dos abrasivos de 5 μm a 10 μm , V_s de 11,3 m/min e V_w igual a 2,4 mm/min, a qual foi utilizada para a fabricação de microcanais em superfícies de silício, resultando em acabamentos R_a em torno de 0,013 μm .

2.2.2 Mecanismos de remoção de material no processo abrasivo

Conforme citado por Cheng *et al.* (2018), existem três distintos regimes de remoção de material, são eles o dúctil, o frágil e o de transição dúctil-frágil. Segundo Blake e Scattergood (1990) e Brinksmeier *et al.* (2010), cada regime é dependente das condições de corte adotadas, da geometria da ferramenta e das propriedades mecânicas e físicas do material avaliado, estando diretamente relacionados com a qualidade da superfície produzida.

De modo geral, durante a retificação, principalmente em função da profundidade de corte considerada, aliada às diferenças nas propriedades mecânicas dos materiais, a partícula abrasiva pode operar conforme quatro mecanismos, apresentados na Fig. 2.14. São eles o microranhuramento (*microgrooving*), o microsulcamento (*microplowing*), o microcorte (*microcutting*) e o microtrincamento (*microcracking*) (ZUM, 1987).

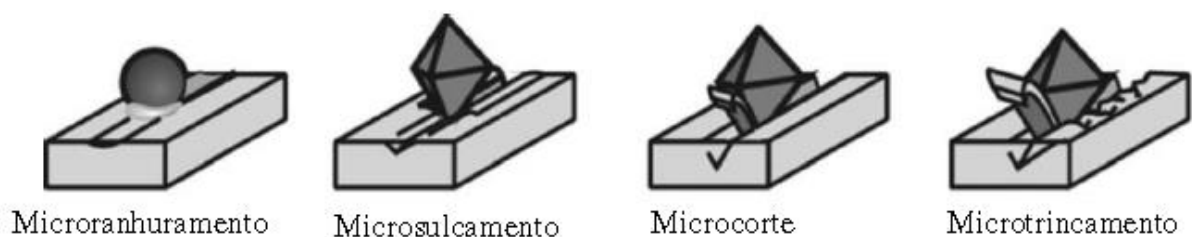


Figura 2.14 - Interação física entre o abrasivo e a superfície da peça na retificação (adaptado de ZUM, 1987; SINHOFF, 1997; BRINKSMEIER *et al.*, 2010 *apud* FIOCCHI, 2014).

A diferença na geometria da aresta de corte do abrasivo representada na primeira situação se deve ao fato do microranhuramento geralmente ocorrer em situações em que a ferramenta já se encontra desgastada, com baixa eficiência de corte. Este mecanismo é caracterizado por uma elevada taxa de deformação plástica da peça, resultante da adoção de uma desfavorável profundidade de corte, em que elevadas tensões de compressão são consequência direta de uma

desgastada aresta do abrasivo (formato esférico), que ao atritar com a superfície, ocasiona a adesão de material e o aumento na pressão específica de corte. O microranhuramento é comum na usinagem de vidros (SINHOFF, 1997).

No microsulcamento, há principalmente deformação plástica do material em direção às bordas do sulco, porém com desprezível remoção de material, de modo que a interação consecutiva de vários abrasivos ou a repetida atuação de um único abrasivo pode levar ao destacamento da borda (AMZALLAG *et al.*, 1982). Esse mecanismo pode ocorrer tanto na usinagem de materiais dúcteis quanto na usinagem de materiais frágeis em regime dúctil (FIOCCHI, 2014), neste último como os vidros, dependendo do raio de ponta da partícula abrasiva e da sua geometria (ZUM, 1987).

O microcorte, por sua vez, é definido pela ocorrência de deformação plástica seguida da formação de cavaco, com volume próximo ao do sulco gerado, sendo encontrado principalmente durante a usinagem de materiais dúcteis, estando diretamente relacionado com *ap*. Um aumento na profundidade pode promover o microcorte (BRINKSMEIER *et al.*, 2010). Todavia, os autores atentam que um aumento excedente no valor da profundidade pode induzir ao microtrincamento subsuperficial da peça.

No microtrincamento, há o nucleamento de trincas e propagação de trincas que podem avançar lateralmente, levando ao destacamento de material, em que o volume removido pode ser superior ao volume do sulco, tipicamente encontrado na usinagem de materiais frágeis, como as cerâmicas (ZUM, 1987).

A usinagem pode passar a atuar em um regime transitório de remoção no caso dos materiais frágeis, em que o modo dúctil pode ser alcançado e promover o microcorte. Para tanto, deve-se adotar valores de profundidade de corte que produzam cavacos com espessura que não exceda um valor máximo de espessura crítica de cavaco, a partir então da qual, se ultrapassada, há formação de microtrincas (BRINKSMEIER *et al.*, 2010; PRATAP *et al.*, 2019). Na retificação de ultraprecisão o mecanismo dúctil é desejado independente da natureza dúctil ou frágil do material (BRINKSMEIER *et al.*, 2010; FIOCCHI, 2014; FIOCCHI *et al.*, 2015; FIOCCHI *et al.*, 2016).

A possibilidade de se alcançar o mecanismo dúctil na retificação de materiais frágeis, como o vidro NbF1, foi investigada por Namba *et al.* (1993). Os autores correlacionaram o mecanismo de remoção com a dimensão média dos abrasivos de diamante e a razão entre o avanço e a rotação do rebolo [$\mu\text{m}/\text{revolução}$], conforme apresentado na Fig. 2.15.

Pela Figura 2.15, verificou-se que a retificação em modo dúctil de remoção pode ser alcançada utilizando-se de abrasivos de diamante de dimensões médias menores que $20\ \mu\text{m}$, destacando que o tamanho das partículas abrasivas no rebolo é um fator determinante quanto ao mecanismo de usinagem. Embora os autores não puderam determinar um ponto exato quanto à transição no modo dúctil-frágil, afirmaram que essa definição é fundamental para a retificação de ultraprecisão em vidros.

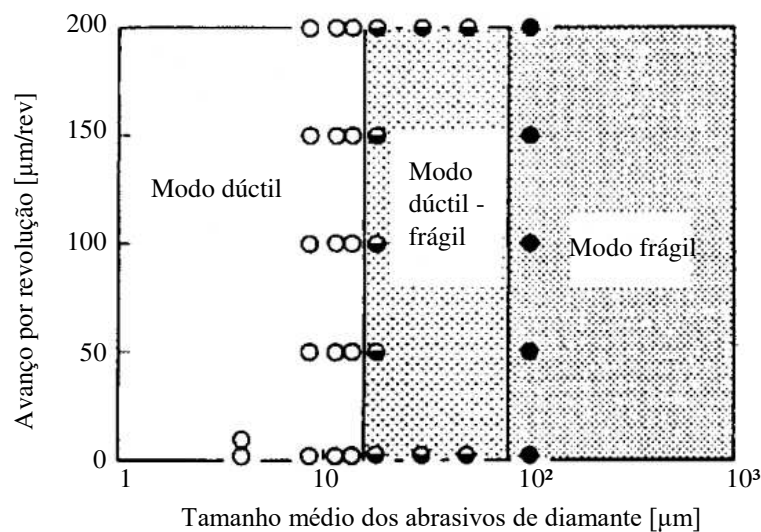


Figura 2.15 - Variação entre o mecanismo de remoção de material na retificação com a razão entre avanço e rotação do rebolo e a dimensão média das partículas abrasivas (adaptado de NAMBA *et al.*, 1993).

Segundo Aurich *et al.* (2015), em regime dúctil, a remoção se caracteriza pela deformação plástica do material, prevalecendo a ocorrência das situações de microsulcamento e microcorte, em que superfícies com melhores acabamentos superficiais, integridade superficial e alta precisão dimensional são produzidas. Nos processos de retificação, o mecanismo é conhecido por abrasão dois corpos, em que o rebolo com abrasivos fixos é capaz de efetuar uma rápida remoção de material (SHAW, 1996; MARINESCU *et al.*, 2007). Um modelo representativo da remoção de material dúctil e consequente formação de cavaco durante a retificação pode ser visualizada na Fig. 2.16, dividida em três etapas.

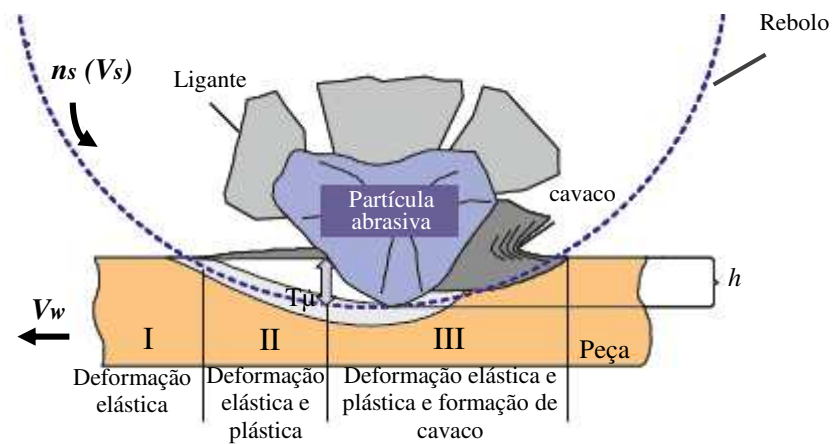


Figura 2.16 - Esquema das etapas de remoção de material durante a retificação de material dúctil (adaptado de KLOCKE, 2009).

Na etapa I, o contato mecânico entre a ferramenta de corte e a peça, seguido pelo movimento relativo entre ambos, promove deformação elástica pelo escorregamento da partícula abrasiva na superfície do material. Na etapa II, há um aumento tanto das tensões compressivas quanto da espessura do cavaco não deformado (h) em função da penetração da partícula abrasiva na peça, em que o material da peça é empurrado para as laterais e frente do abrasivo. Esta etapa (sulcamento/riscamento) é caracterizada pela deformação plástica de material sem ocasionar formação de cavaco, em que há um aumento na área de contato entre abrasivo e peça e também no atrito produzido entre a superfície desgastada do abrasivo e a da peça. Por fim, na etapa III, a aresta cortante do abrasivo atinge um valor de profundidade de corte crítica (T_{μ}), a qual provoca a fratura de uma pequena porção de material em função da extrapolação da tensão de ruptura do material. Neste momento, inicia-se a formação do cavaco, em que a maior parte da energia produzida no processo passa a ser direcionada ao cisalhamento do material (MARINESCU *et al.*, 2007).

Quanto à retificação de materiais frágeis, como as cerâmicas, Inasaki (1987) propõe um modelo de remoção pela atuação da partícula abrasiva esquematizado na Fig. 2.17. Conforme explica o autor, o material é removido por meio de um lascamento superficial, que pode ser decorrente do fenômeno de nucleação de trincas radiais no material, em que há a possibilidade de que os cavacos produzidos dessas fraturas frágeis apresentem tamanhos maiores do que a ap adotada, em decorrência da propagação de trincas laterais subsuperficiais.

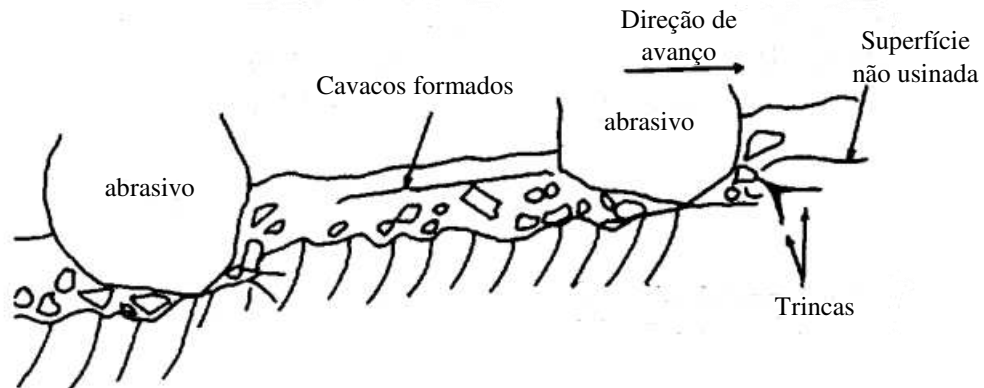


Figura 2.17 – Modelo esquemático da formação de cavaco na retificação de materiais frágeis (adaptado de INASAKI, 1987).

2.2.3 Vida do rebolo (Relação G)

É de vital importância em um processo de usinagem considerar a vida da ferramenta, uma vez que ela está diretamente relacionada à forma e precisão dimensional das peças fabricadas. Nos processos abrasivos, o desgaste do rebolo também pode afetar a estrutura dos cavacos produzidos, e geralmente é causado pelo desgaste e/ou fratura das partículas abrasivas, empastamento da ferramenta (adesão de material usinado) e desprendimento/arrancamento do abrasivo (YA-DONG *et al.*, 2018).

De acordo com Bianchi (1990), diversos fatores podem afetar a vida do rebolo, como o diâmetro, a largura da camada abrasiva, a sua composição, o tipo de material a ser retificado e os parâmetros de corte adotados, de modo que o conhecimento do seu desempenho possibilita determinar a viabilidade da operação. Para avaliar o desgaste da ferramenta ao longo do seu uso, é comumente utilizado o parâmetro G , conhecido como relação G ou valor G , definido pelo quociente apresentado na Eq. (2.1).

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1), Z_w refere-se ao volume de material removido da peça e Z_s ao volume de material desgastado do rebolo, em que G pode ser um valor pequeno igual a 1 ou elevado maior que 5 000. Um valor muito alto de G indica que a ferramenta utilizada é muito dura para o material usinado, em que há baixa perda de abrasivos e queda da agressividade do rebolo. Em contrapartida, um valor muito baixo de G caracteriza um alto desgaste do rebolo, em que a

agressividade da ferramenta permanece em alta e a remoção de material da peça é reduzida (ROWE, 2009).

O desgaste do rebolo também pode ser avaliado por meio da medição da variação mássica ou de medidas lineares, como largura e diâmetro da ferramenta de corte, antes e após a usinagem, uma vez que a vida pode ser caracterizada pela variação destas características. Destaca-se que a retificação de materiais de difícil usinagem resulta em maior desgaste da ferramenta de corte (comparado a materiais de corte facilitado ou de melhor usinabilidade), provocando aumento nos custos de produção e falhas dimensionais, resultando em queda na qualidade superficial das peças fabricadas (ZABORSKI *et al.*, 2004).

Wen e Gong (2017) investigaram os mecanismos de desgaste de rebolos com abrasivos de diamante eletrodepositados durante a microrretificação de componentes em vidro de soda-lime, buscando determinar um modelo que previsse o comportamento da ferramenta e possibilitasse o aprimoramento de seu desempenho, estendendo a vida da ferramenta. Para tanto, foi avaliado o diâmetro do rebolo, a relação entre desgaste e fratura dos abrasivos, a rugosidade superficial das peças obtidas e a relação com os parâmetros de corte adotados. Os autores destacaram a necessidade de monitoramento e a utilização de rebolos e parâmetros adequados durante o processo em microescala, uma vez que devido a influência do efeito escala e a espessura mínima de cavaco, os resultados obtidos apresentaram índices elevados de desgaste da ferramenta.

Rai *et al.* (2019) avaliaram a retificação da liga Ti-6Al-4V e determinaram a relação G do rebolo (diâmetro 200 mm, abrasivos de Al_2O_3 , V_s 30 m/s) considerando a variação do número de passes de usinagem (5 a 25) e da penetração de trabalho a_e (10 μ m e 20 μ m) estabelecidos. O volume de material removido foi calculado ao final de cada conjunto de passes pela medição da diferença na altura da peça. Como resultado, os autores identificaram que G aumentou quando ambos número e passe e a_e foram aumentados, conseqüentemente removendo uma maior quantidade de material.

2.2.4 Temperatura

Em um processo abrasivo, o atrito entre cada partícula abrasiva e a superfície da peça, provocando o aumento das tensões seguido de deformação plástica e resultando na formação de cavaco, contribuem para elevar a temperatura na interface rebolo/peça (ROWE, 2009). Na retificação em macroescala, são atingidas temperaturas elevadas, de modo que cerca de 85 % do calor gerado é transferido para a peça, 10 % para o rebolo e os 5 % restantes são transmitidos

para o cavaco. Essa divisão é preocupante ao se considerar os efeitos resultantes na qualidade superficial da peça, a qual recebe a maior parcela de calor, em que mudanças estruturais e geração de erros de forma e de dimensão podem ocorrer (DINIZ *et al.*, 2008).

Todavia, ao se considerar o processo em microescala, a menor área de contato entre a ferramenta e a peça reduzem significativamente as temperaturas alcançadas na região de corte. Segundo Ding *et al.* (2016), a máxima temperatura atingida no processo ocorre imediatamente ao corte e se concentra entre o cavaco e a superfície de contato entre a peça e o cavaco. Essa temperatura é, então, eliminada rapidamente pela ação do abrasivo ao remover material, não promovendo tempo suficiente para que haja transferência de calor para a peça.

Na Figura 2.18 é mostrada a curva de distribuição de temperatura obtida por simulação numérica durante a microrretificação em aço maraging considerando a ação de uma única partícula abrasiva. As cores verde, amarelo e vermelho representam a intensidade da temperatura em ordem crescente de escala (°C), sendo o tom intenso avermelhado correspondente a máxima temperatura alcançada, em que q_t (fluxo total de calor) se refere ao somatório dos calores gerados para a peça (1), o microrrebolo (2) e para o cavaco (3).

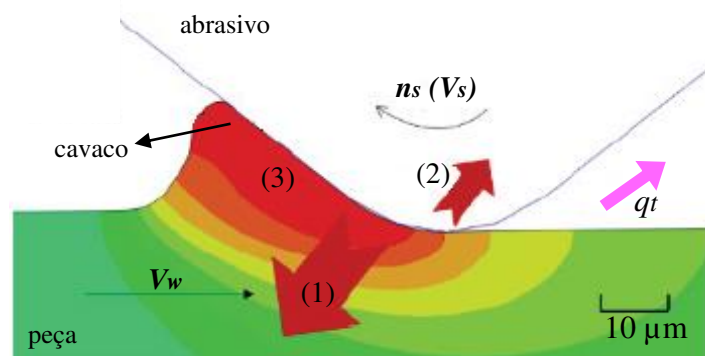


Figura 2.18 - Modelo numérico de distribuição da temperatura durante a microrretificação (adaptado de DING *et al.*, 2016).

O valor de máxima temperatura obtido na peça corresponde a cerca de 41,1 % a 60,9 % do valor da máxima temperatura alcançada no cavaco, o qual recebe a maior parcela de calor gerado (DING *et al.*, 2016), sugerindo que a influência dos efeitos da temperatura na qualidade da peça em processos abrasivos pode ser amenizada ao se trabalhar em microescala.

Estudos de Park e Liang (2008) frente à microrretificação da liga de alumínio Al 6061 mostram que as temperaturas alcançadas no processo com a variação da profundidade de corte não ultrapassaram 35 °C. Todavia, os autores atentam quanto ao processo considerando

materiais frágeis, em que mesmo em escala reduzida, a temperatura pode ser influente e acelerar o desgaste da ferramenta, prejudicando a integridade estrutural da superfície usinada.

Apesar das menores temperaturas, de modo a reduzir os impactos mecânicos, térmicos e químicos em função do calor gerado na peça, podem ser utilizados fluidos de corte durante a remoção de material. O efeito lubrificante de um fluido de corte objetiva diminuir o atrito entre o abrasivo e a peça, assim como entre o ligante e a peça, ao passo que o efeito refrigerante tende a resfriar a zona de contato do processo por meio da absorção e transporte do calor gerado. A solução também facilita a remoção dos cavacos formados da zona de contato e proporciona proteção ao equipamento contra corrosão (MARINESCU *et al.*, 2007).

Estudos de Liu *et al.* (2019) apresentam uma comparação entre diferentes métodos de lubrificação e refrigeração durante ensaios de microrretificação em superfícies de aço GrC15, em que os autores consideram a usinagem a seco, por jato de plasma em pressão atmosférica (APPJ – *Atmospheric Pressure Plasma Jet*), por MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante) e uma combinação entre APPJ + MQL. A técnica MQL combina ar comprimido a um baixo consumo de óleo, aplicados em forma de aerossol (SADEGHI *et al.*, 2009; SETTI *et al.*, 2015). A utilização da combinação entre APPJ e MQL foi capaz de reduzir expressivamente a temperatura e as forças de corte durante a microrretificação, na faixa de 47 % para o primeiro e 82 % para o segundo. Em relação ao MQL, houve também redução nas forças de corte, em menor magnitude, igual a 48 % ao considerar a utilização da técnica combinada.

2.2.5 Vibrações mecânicas

Durante a retificação, basicamente dois modos de vibrações podem ocorrer, são elas as forçadas e as auto-excitadas, sendo responsáveis por alterações macro e microgeométricas na superfície de trabalho, influenciando na rugosidade (THOMAZELLA *et al.*, 2019) e promovendo perda de precisão dimensional e queda de produtividade (INASAKI *et al.*, 2001).

As vibrações forçadas são causadas por perturbações periódicas externas ao processo de corte, como o desbalanceamento do rebolo, do motor elétrico, dos rolamentos, ou até mesmo relacionadas à presença de outras máquinas próximas (MALKIN; GUO, 2008). Segundo Gawlak (1984), o desbalanceamento do rebolo é uma das principais causas de vibrações forçadas e da deterioração da superfície da peça.

A vibração auto-excitada (do inglês *chatter*), por outro lado, é entendida como uma vibração excessiva indesejada entre a ferramenta e a peça, resultante do processo dinâmico e inerente ao cisalhamento do material, em que a sua amplitude aumenta com o tempo

(THOMAZELLA *et al.*, 2019). Como resultado, ocorre deterioração da integridade superficial e subsuperficial e aceleração do desgaste ou avaria da ferramenta (WIERCHIGROCH; BUDAK, 2001). O efeito regenerativo (regeneração da superfície ondulada) é considerado uma das principais causas do *chatter* (WIERCHIGROCH; BUDAK, 2001; MARINESCU *et al.*, 2007; NOVAKOV; JACKSON, 2009). Na Figura 2.19 é representada a interface de contato entre a peça e o rebolo.

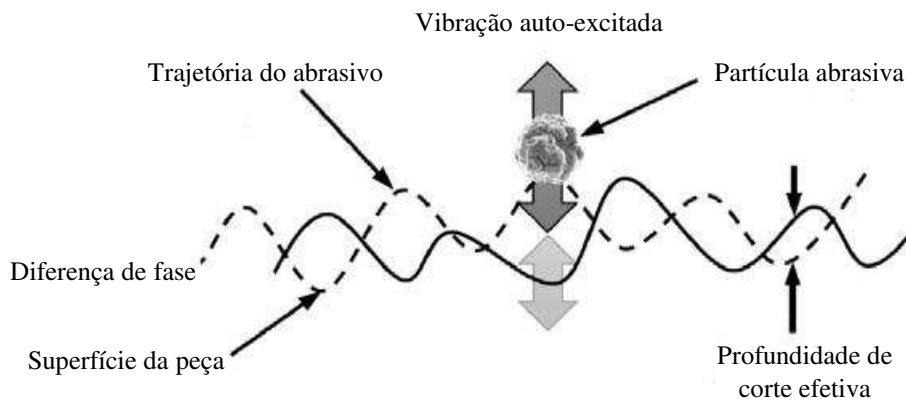


Figura 2.19 - Esquema representativo do *chatter* na retificação (adaptado de THOMAZELLA *et al.*, 2019).

Conforme abordado por Thomazella *et al.* (2019), a cinemática do processo de remoção de material durante a retificação promove a formação de ondulações sob a superfície do material resultantes das amplitudes de vibração relativa entre a peça de trabalho e a ferramenta de corte. Consequentemente, são encontradas variações entre a_p e a profundidade de corte efetiva das partículas abrasivas, de modo que a diferença de fase entre essas ondas macrogeométricas torna o processo instável (efeito regenerativo). Pela Figura 2.19, nota-se que as amplitudes das ondas geradas na superfície da peça aumentam rapidamente, diferentemente do observado no rebolo. Isso ocorre porque o rebolo tem uma maior resistência ao desgaste, de modo que as ondulações geradas em sua superfície aumentam em menor grau, estando diretamente relacionadas à vida e à sua agressividade (INASAKI *et al.*, 2001; THOMAZELLA *et al.*, 2019).

Segundo Orynski e Pawlowski (1999), as consequências do *chatter* na superfície da peça não são facilmente eliminadas e são difíceis de serem mensuradas, embora possam ser visíveis a olho nu. Liu *et al.* (2016) avaliaram a influência desse modo de vibração na superfície de engrenagens retificadas. Na Figura 2.20 são mostradas as perfilometrias 3D do flanco do dente de uma engrenagem em duas diferentes situações, em (a) na ausência e em (b) na presença de vibrações auto-excitadas. Nota-se que a topografia da superfície do flanco do dente sob vibração

é mais áspera, exibindo diferentes e mais intensas colorações que indicam a presença aparente de picos mais altos e vales mais profundos. Em oposição, o comportamento apresentado na Fig. 2.20a se apresenta caracteristicamente mais plano.

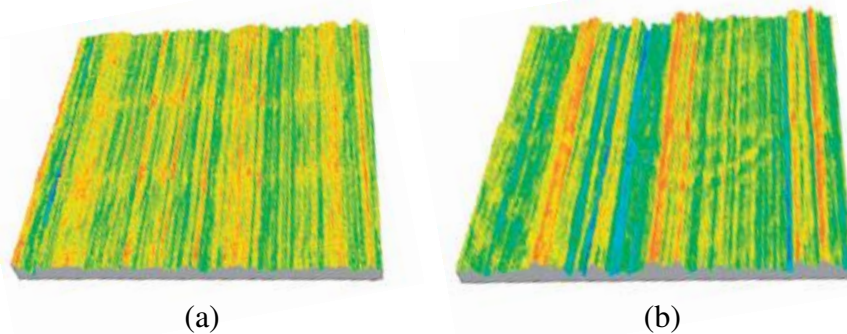


Figura 2.20 - Topografias superficiais em 3D do flanco do dente de uma engrenagem em situação de (a) ausência e (b) presença de *chatter* durante a retificação (LIU *et al.*, 2016).

Na microusinagem, em função das elevadas velocidades de corte, a situação pode se tornar ainda mais crítica devido aos efeitos das vibrações, afetando significativamente a remoção de material e a formação dos cavacos (VENKATESH *et al.*, 2016). Jiang *et al.* (2017) ressaltam a influência da vibração mecânica na qualidade superficial das peças microrretificadas, e afirmam ser um fenômeno físico intrínseco ao processo de fabricação, podendo resultar em *chatter* e provocar danos irreparáveis ao sistema.

De modo a investigar tais efeitos, Li *et al.* (1999) analisaram a microrretificação em vidros BK7 variando-se a profundidade de corte em três níveis (5 μm , 10 μm e 15 μm), por meio de rebolos diamantados com granulometria 2/4 μm e ligante resinoide. Os autores perceberam que para o primeiro valor adotado, não foram detectadas impressões da ferramenta na superfície final da peça além das marcas de avanço, ao passo que para as condições de *ap* iguais a 10 μm e 15 μm , foram observadas marcas profundas na superfície, indicando que se atingiu um valor crítico para o qual se iniciam as vibrações. Tal ocorrência também pode estar relacionada à instabilidade no regime de transição dúctil-frágil experimentada pelo vidro. Concluiu-se que ações como limitar a profundidade de corte (consequentemente resultando em queda na produtividade do processo) ou elevar a resistência na estrutura da máquina e da ferramenta, podem reduzir o *chatter*.

Feng *et al.* (2009), por outro lado, investigaram o desgaste da ferramenta abrasiva durante a microrretificação de microcanais em peças cerâmicas de zircônia. Esses autores mencionam que as maiores deflexões do rebolo em cada passe de usinagem, resultantes de uma menor

rigidez da ferramenta característica da redução de escala, afetam o valor da profundidade de corte efetiva, causando um aumento das forças de retificação e da vibração do sistema mecânico, em que o desgaste do microrrebolo é acelerado, resultando em uma geometria instável e acabamento prejudicado do canal usinado.

2.2.6 Rugosidade

A qualidade do acabamento de uma peça é de fundamental importância principalmente em situações que abrangem componentes que apresentam uma face de deslizamento ou que são utilizadas para acoplamento entre diferentes superfícies (JIN e CHENG, 2017), podendo ser quantificada por meio da medição da rugosidade superficial. Compreendida como os desvios microgeométricos, a rugosidade se caracteriza por sinais de alta frequência e baixa amplitude, influenciando diretamente no desempenho e nas características funcionais de um elemento mecânico (PIRATELLI-FILHO, 2011).

Para a medição da rugosidade, são utilizados instrumentos de medição adequados, basicamente divididos em dois grupos de abordagem, os que efetuam medição sem contato e os que realizam medição com contato, cada qual com suas particularidades. Segundo os autores Chand *et al.* (2011) e Motta-Neto *et al.* (2018), geralmente e principalmente na indústria, faz-se a utilização do método com contato em virtude do menor custo e maior facilidade de manuseio do equipamento, no qual um apalpador, em contato com a superfície avaliada, realiza uma varredura programada e tal movimento é convertido em um sinal elétrico. A medição com contato é efetuada por meio de um rugosímetro ou perfilômetro, compostos por filtros passa-alta, responsáveis por eliminarem sinais de frequências inferiores à dos sinais de rugosidade.

A extensão do trecho útil para medição percorrido pela ponta do apalpador é adotada como sendo igual a 5 vezes o valor do *cut-off* selecionado. Para a determinação desse *cut-off*, a norma ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008) estabelece uma faixa de valores para o parâmetro de rugosidade *Ra* no qual devem ser enquadrados o resultado da medição para garantir a correta filtragem dos sinais avaliados, apresentada na Tab. 2.3.

No caso dos processos abrasivos, diversos fatores podem afetar a qualidade da superfície usinada, em que além dos parâmetros de corte, características como a geometria da ferramenta, o formato, a dimensão e a protrusão dos abrasivos, bem como o distanciamento entre eles (YIN *et al.*, 2018) influenciam nos valores dos parâmetros de rugosidade. A utilização de partículas abrasivas de maior *mesh* (mais finas) é capaz de promover a obtenção de melhores acabamentos (AURICH *et al.*, 2015).

Tabela 2.3 - Relação entre a rugosidade Ra e os valores de $cut-off$ (ABNT, 2008).

Rugosidade Ra (μm)	Comprimento $cut-off$ (mm)	Comprimento de avaliação (mm)
$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

Cheng *et al.* (2013) avaliaram a fabricação de microcanais por meio da microrretificação em peças de vidro (soda-cal) com microrrebolos diamantados, em que os autores apresentam os dados de rotação (35 000 rpm a 120 000 rpm), V_w (100 $\mu\text{m/s}$ a 500 $\mu\text{m/s}$) e a_p (10 μm a 30 μm) utilizados. Os resultados mostraram que os menores valores de Ra (valor médio em torno de 0,40 μm) encontrados ocorreram ao se utilizar menores V_w , em que houve um aumento de 312 % no valor da rugosidade Ra com o aumento de V_w de 100 $\mu\text{m/s}$ a 500 $\mu\text{m/s}$, e uma redução de 70,5 % com o aumento de V_s , indicando que menores avanços aliados à maiores V_s são capazes de fornecer um melhor acabamento superficial. Em relação à profundidade de corte, os autores não encontraram uma correlação definida com os valores de rugosidade encontrados.

Jin e Cheng (2017) investigaram a usinagem de microcanais em peças de safira por meio da microrretificação e obtiveram resultados semelhantes aos de Cheng *et al.* (2013). Um diagrama esquemático do sistema mecânico montado para o desenvolvimento e monitoramento dos ensaios é representado na Fig. 2.21.

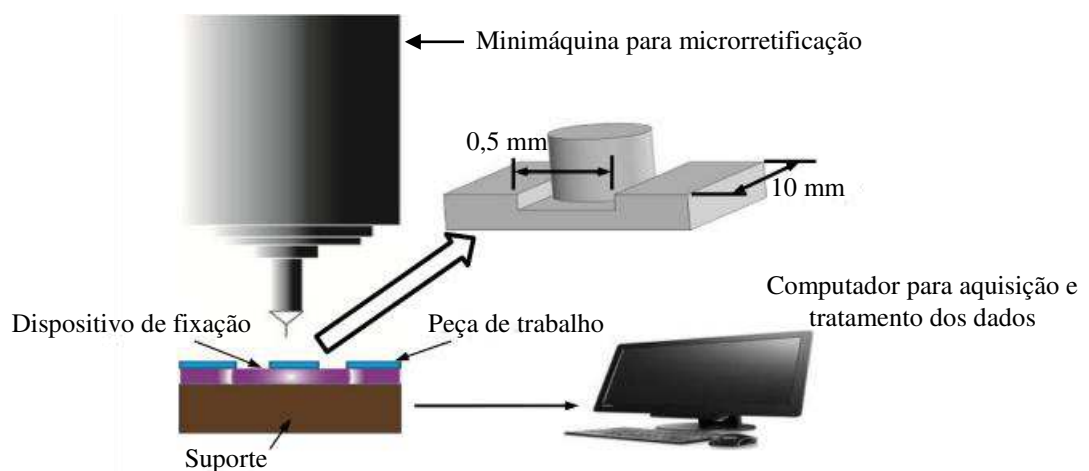


Figura 2.21 - Esquema representativo de um sistema mecânico para realização e monitoramento de ensaios de microrretificação (adaptado de JIN; CHENG, 2017).

Após os ensaios, o menor valor de Ra ($0,65 \mu\text{m}$) foi encontrado na condição de maior Vs considerada, ao passo que com o aumento em Vw as superfícies se apresentaram mais rugosas. A relação entre a profundidade de corte e os valores de Ra não apresentou uma tendência regular. Os valores e a representação gráfica dos resultados dos parâmetros de corte considerados pelos autores (Vw , ap e Vs), são exibidos na Fig. 2.22a 2.22b e 2.22c, respectivamente, em termos do parâmetro de rugosidade Ra .

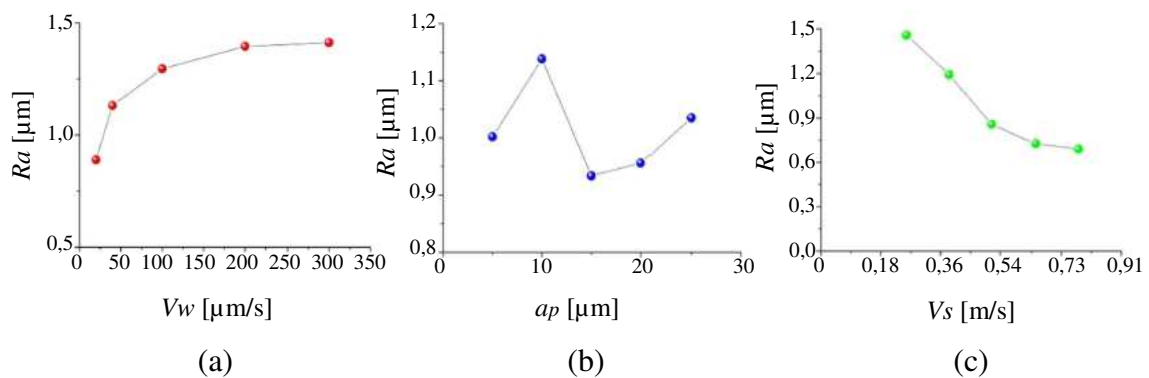


Figura 2.22 - Relação entre a rugosidade Ra e as condições de corte (a) Vw , (b) ap e (c) Vs , durante a microrretificação em amostras de safira (adaptado de JIN e CHENG, 2017).

Yin *et al.* (2018) analisaram o comportamento das ligas FeCrCoNiMn e Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ ao serem usinadas pelo processo de microrretificação, considerando microrrebolos de 0,9 mm de diâmetro e abrasivos de CBN de granulometria igual a 200 *mesh* e 500 *mesh*. Variações na rotação (associada à Vs), em Vw e ap também foram investigadas, considerando valores de 20 000 rpm a 60 000 rpm para o primeiro, 20 $\mu\text{m/s}$ a 200 $\mu\text{m/s}$ para o segundo e 2 μm a 10 μm para o terceiro. Novamente, os menores valores de Ra foram encontrados para as condições em que foram adotados os maiores Vs e menores Vw . Em relação à dimensão das partículas abrasivas, as menores rugosidades foram obtidas quando da utilização de maiores granulometrias, em que Ra resultou, mantendo-se as demais condições de corte constantes, em 1,64 μm ao considerar o microrrebolo de CBN #500 e 1,83 μm com o microrrebolo de CBN #200. Frente à profundidade de corte, diferentemente dos resultados encontrados por Cheng *et al.* (2013) e Jin e Cheng (2017), Yin *et al.* (2018) encontraram uma correlação entre a rugosidade e a profundidade de corte, em que o aumento em ap provocou queda na qualidade do acabamento superficial (maior Ra), justificado pela elevação na espessura do cavaco não deformado e na força de corte.

2.3 Usinagem eletroquímica

Dentro do campo da usinagem não-convencional, encontra-se a usinagem eletroquímica, abreviada pela sigla ECM (do inglês *Electrochemical Machining*), na qual ocorre a conversão de energia elétrica em energia química para remoção de material. Amplamente difundida na área industrial, principalmente na aeronáutica e biomédica, a ECM eficientemente produz superfícies e características precisas com elevada complexidade em materiais de difícil usinagem, como as superligas de níquel e as ligas de titânio (QU *et al.*, 2013).

Por meio de processos eletroquímicos também é possível efetuar a usinagem de um perfil aproximadamente complementar ao da ferramenta (ACHARYA *et al.*, 1986). Silva Neto *et al.* (2006) e Jeykrishan *et al.* (2017) destacam a elevada versatilidade da usinagem eletroquímica, capaz de usinar basicamente qualquer material condutor de eletricidade independentemente das suas propriedades mecânicas como dureza, resistência mecânica e fragilidade, uma vez que não há o contato mecânico entre peça e ferramenta. A possibilidade de obtenção de complexas formas e superfícies brilhantes em virtude da remoção de pequenas porções de material também são um atrativo para a utilização do processo (RUSZAJ, 2017; LOHRENGEL *et al.*, 2016).

A aplicabilidade da eletroquímica se estende para operações de rebarbação e fabricação de furos e microfuros em componentes automotivos, atuando também na produção de pás de turbinas, engrenagens, implantes cirúrgicos, matrizes e moldes (RAJURKAR *et al.*, 2013). De acordo com Kunar e Bhattacharyya (2019), a usinagem eletroquímica também é efetiva na produção de microcanais, os quais atuam como parte integrante de dispositivos como microtrocares de calor e microcélulas de combustível. Nas Figuras 2.23a e 2.23b são mostrados componentes obtidos por usinagem eletroquímica.

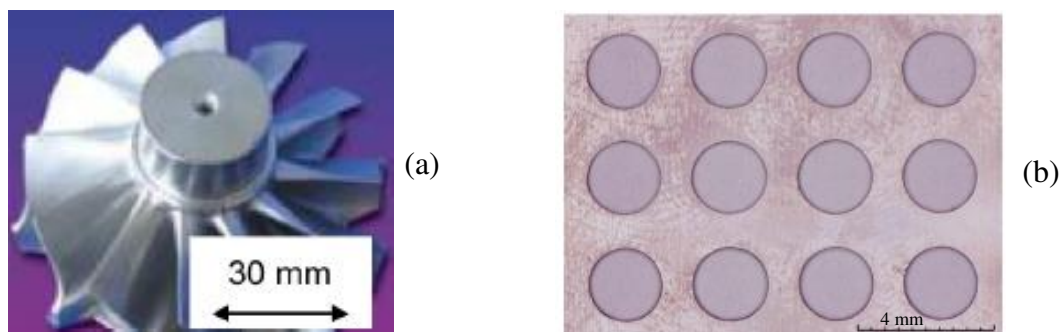


Figura 2.23 - Exemplos da usinagem eletroquímica para fabricação de (a) turbocompressores (adaptado de GIESE, 2005 *apud* KLOCKE *et al.*, 2014) e (b) microfuros em chapas de Ti-6Al-4V (LI *et al.*, 2016).

2.3.1 Mecanismo de remoção de material

Regido pelas leis de Faraday, o mecanismo de remoção na usinagem eletroquímica consiste na eletrólise por meio da dissociação anódica do material base da peça. Uma fonte de tensão elétrica é responsável em fornecer corrente elétrica contínua (CC) à região entre os eletrodos peça de trabalho e ferramenta, espaçados por uma distância *gap*, de modo que ambos se encontram conectados aos polos da fonte, o primeiro ao positivo (ânodo) e o segundo ao negativo (cátodo). Uma solução, denominada eletrólito (ou fluido eletrolítico), é bombeada no circuito fechado no interior do *gap*, de modo que a aproximação programada entre os eletrodos promove a ocorrência das reações eletroquímicas (LOHRENGEL *et al.*, 2016).

O arranjo geométrico da ferramenta e da peça provoca uma distribuição de densidade de corrente não homogênea no eletrólito (responsável pelo transporte da corrente elétrica) de tal modo que a densidade se apresenta mais acentuada no *gap* do que na vizinhança (KOCK *et al.*, 2003), como mostrado na Fig. 2.24. Rajurkar *et al.* (1999) e Rajurkar *et al.* (2013) afirmam que região do *gap* deve ser pequena para que se atinja densidades de corrente elevadas (grandezas inversamente proporcionais), garantindo maiores taxas de dissociação anódica, sendo geralmente adotados valores entre 0,1 mm a 0,6 mm.

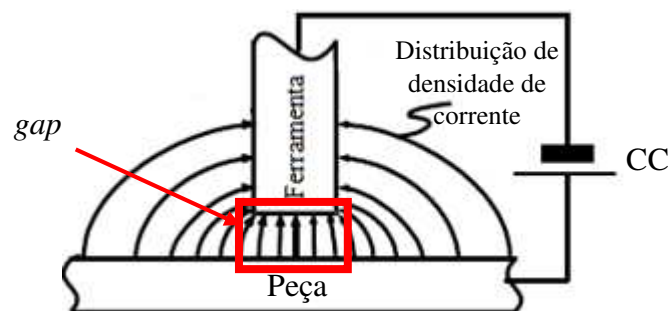


Figura 2.24 - Esboço da distribuição de densidade de corrente elétrica contínua na usinagem eletroquímica (adaptado de KOCK *et al.*, 2003).

Ao longo do processo, são formados óxidos e hidróxidos metálicos entre a ferramenta e a peça, originados pela passagem da corrente no sistema, os quais podem aderir à superfície da peça, criando uma camada passivadora, a qual atua como uma barreira isolante responsável por prejudicar a ocorrência das reações eletroquímicas e a eficiência do processo de remoção almejado (LEESE e IVANOV, 2016). De acordo com Kumar *et al.* (2018), quando em suspensão ou de baixa aderência, tais produtos podem ser removidos pela utilização de vazões adequadas de eletrólito.

Na Figura 2.25 é ilustrado um diagrama representativo da usinagem eletroquímica para a fabricação de um furo de seção circular, em que um eletrodo tubular se desloca verticalmente, a uma distância mínima e constante da peça, em direção à mesma. Nota-se a presença de um revestimento de material isolante elétrico nas laterais da ferramenta, o qual é utilizado em processos que demandam uma melhor precisão, uma vez que restringe a dispersão de corrente elétrica para regiões além do interesse da usinagem, o que poderia ocasionar corrosão por dispersão, prejudicando o acabamento superficial.

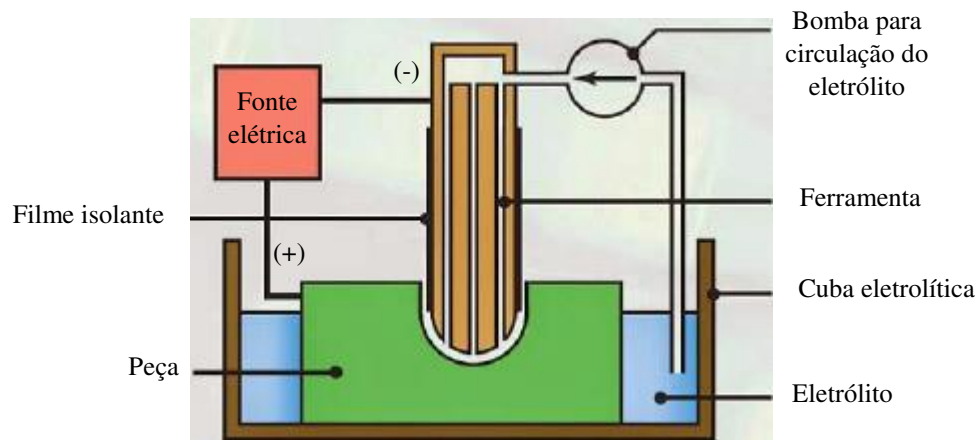


Figura 2.25 - Esquema da usinagem eletroquímica (adaptado de KUMAR *et al.*, 2018).

Para que a usinagem ocorra, um sistema eletrolítico deve ser montado, o qual geralmente é composto por bombas d'água, mangueiras de conexão, filtros, fonte de tensão elétrica, reservatório para o eletrólito e uma cuba eletrolítica, no interior da qual as reações possam ocorrer, além dos eletrodos peça e ferramenta, podendo esta ser pré-moldada ou de geometria universal (RAJURKAR *et al.*, 2013). Segundo Kumar *et al.* (2018), a reação anódica de dissociação do material base da peça durante a corrosão ao entrar em contato com a corrente elétrica conduzida pelo eletrólito ocorre de acordo com a Eq. (2.2).



Na equação, Mb representa o metal base, N o número de elétrons e da sua camada de valência (dependente do eletrólito considerado) e OH o íon hidroxila resultante da dissociação da água, o qual reage com o material ionizado produzindo hidróxidos. A reação catódica equivalente na superfície da ferramenta consiste na desionização dos íons de hidrogênio,

formando-se gás, o qual é liberado para a atmosfera. De acordo com Ruszaj (2017), a passagem da corrente elétrica também transforma energia na forma de calor conforme a lei de Joule. O autor ressalta que os produtos resultantes do processo (sólidos em suspensão, gás hidrogênio e o calor gerado) afetam significativamente a distribuição da condutividade e também a dimensão do *gap*, devendo ser removidos pelo fluxo do eletrólito circulante. Naturalmente os hidróxidos tendem a precipitarem ou devem ser removidos da solução por filtragem.

2.3.2 Influência dos parâmetros de usinagem na taxa de remoção de material

Conforme Uttarwar e Chopde (2013) apresentam, a remoção de material durante a ECM depende significativamente da velocidade de avanço da ferramenta. À medida em que o cátodo se movimenta em direção ao ânodo, a área percorrida pela corrente se reduz e a sua magnitude se eleva, intensificando as reações, até que seja mantido um valor estável de *gap*. A precisão do processo durante a eletrólise e a consequente qualidade das peças usinadas por meio do processo eletroquímico dependem do controle dos parâmetros, específicos para cada sistema eletroquímico, ao que tange ao eletrólito (abordado no item 2.3.3), a ferramenta e a fonte de tensão elétrica, bem como seus reflexos frente ao valor de *gap* adotado.

Para que haja um equilíbrio entre remoção de material e obtenção de menores rugosidades superficiais, é importante que a ferramenta se desloque em direção à peça com a mesma velocidade em que o material é usinado (KUMAR *et al.*, 2018), de modo que velocidades abaixo dessa condição podem resultar em um aumento no *gap* e consequente redução no valor da densidade de corrente, prejudicando o processo (XUEZHEN *et al.*, 2016). Com um aumento na velocidade, favorece-se a obtenção de maiores taxas de remoção de material em função da intensificação das reações, obtendo-se uma superfície mais homogênea e menos rugosa (SILVA NETO *et al.*, 2006). Todavia, um contínuo aumento no avanço pode ocasionar o empilhamento de produtos oriundos das reações, reduzindo a condutividade elétrica local e resultando em possível contato entre os eletrodos, provocando curtos-circuitos (KOZAK *et al.*, 2004).

A taxa de remoção de material também varia proporcionalmente à tensão elétrica selecionada. De acordo com Kumar *et al.* (2018), maiores tensões intensificam a ocorrência das reações por aumentarem a densidade de corrente, promovendo maiores remoções de material e a obtenção de acabamentos menos rugosos. Kozak *et al.* (2004), entretanto, também alertam sobre a necessidade em se restringir tais valores. Segundo estes autores, uma baixa tensão pode não ser capaz de favorecer a ocorrência das reações de dissociação do material metálico de tal modo que, somada ao movimento da ferramenta, esta acabaria encostando na superfície da peça,

provocando curto-circuito. Em contrapartida, com um contínuo aumento da tensão, a instabilidade elétrica resultaria em maiores sobrecortes laterais e formação de impurezas de difícil dissolução, que podem se aderir à superfície.

Com base em avaliar as limitações quanto aos parâmetros de usinagem eletroquímica, Xu *et al.* (2016) investigaram a formação de filetes para lâminas em *blisks*, empregados na indústria aeroespacial, em uma peça da liga de titânio Ti60 (vide Fig. 2.26a) para compor a estrutura apresentada na Fig. 2.26b. Para tanto, consideraram a utilização de um eletrodo de aço inoxidável (que se movimenta em direção ao material), uma solução aquosa de NaCl concentração 10 % a 40 °C, tensão de 30 V e um *gap* igual a 0,5 mm, objetivando manter altas correntes durante o processo.

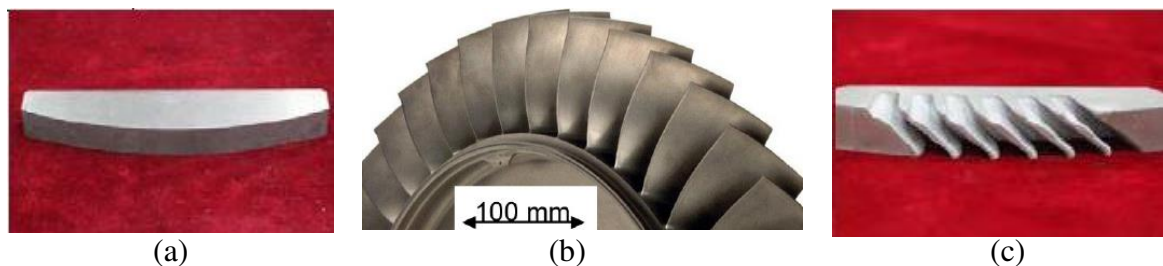


Figura 2.26 - Em (a) peça de Ti60 bruta de trabalho, em (b) modelo em formato final de um *blisk* (KLOCKE *et al.*, 2014) e em (c) filetes usinados eletroquimicamente (XU *et al.*, 2016).

Os autores destacaram que embora houvesse a disponibilidade em se utilizar da máxima velocidade de avanço da ferramenta, igual a 1,5 mm/min, tal ação aumentaria a probabilidade em resultar no contato do eletrodo com a superfície de trabalho, em função de uma possível redução no valor do *gap*, aumentando o risco da ocorrência de curto-circuito no sistema, o que prejudicaria a eficiência do processo. Deste modo, adotaram um valor de velocidade intermediário (igual a 1,2 mm/min) objetivando uma maior estabilidade e homogeneidade na dissociação do material, obtendo-se, na condição final ótima pós-acabamento, conforme exibido na Fig. 2.26c, uma rugosidade Ra na ordem de 0,60 μm .

2.3.3 Eletrólito

Durante a usinagem eletroquímica o eletrólito possui basicamente três funções: transportar a corrente entre a ferramenta e a peça completando o circuito, remover os produtos da reação da região de corte e remover o calor produzido na operação (MUKHERJEE *et al.*, 2007). A velocidade com que o eletrólito é bombeado no circuito interfere diretamente na taxa

de remoção de material, em que altas vazões são capazes de possibilitar maiores remoções promovidas pela intensificação das reações de dissociação anódica do material resultante da passagem da corrente elétrica, porém também podem resultar em maior sobrecorte lateral (DHOBE *et al.*, 2011).

Como características, Leese e Ivanov (2016) destacam que um fluido eletrolítico deve apresentar alta condutividade elétrica, baixas toxicidade e tendência a corrosão, além de estabilidade química e eletroquímica. A escolha sobre qual fluido eletrolítico utilizar durante um ensaio deve também considerar o material a ser usinado, em que geralmente, os eletrólitos mais utilizados são as soluções aquosas neutras de sal NaCl e NaNO₃, em função do baixo custo. Segundo Xu *et al.* (2016), a condutividade de um eletrólito depende principalmente da sua temperatura e da sua concentração, de modo que soluções com maiores temperaturas viabilizam a ocorrência das reações eletroquímicas. Entretanto, Xuezheng *et al.* (2016) atentam ao contínuo aumento na temperatura da solução durante a usinagem eletroquímica em ligas de titânio, uma vez que pode resultar na formação de precipitados de óxidos e hidróxidos com ligações mais fortes, capazes de deteriorar o acabamento superficial das peças finais.

Em relação à concentração, conforme Silva *et al.* (2003) informam, tipicamente são utilizados eletrólitos com 200 g de soluto em 1 L de água, sendo este um valor variável de acordo com as demais condições de ensaio. Fluidos com maiores concentrações proporcionam uma melhor condutividade elétrica na região do *gap*, permitindo que sejam alcançadas altas taxas de remoção de material sem que haja a necessidade da utilização de maiores tensões, ao passo que menores concentrações fornecem menores custos e uma dissociação mais uniforme. Contudo, eletrólitos altamente concentrados podem promover a formação de precipitados, responsáveis em danificar a estrutura das bombas e dos filtros (MUKHERJEE *et al.*, 2007).

Segundo Uttarwar e Chopde (2013), os eletrólitos podem ser classificados em passivadores, como a solução aquosa de NaNO₃, apresentando ânions oxidantes, e não-passivadores, como a solução aquosa de NaCl, contendo ânions agressivos (o cloro). Eletrólitos passivadores induzem um maior desenvolvimento de um filme passivador sobre a peça, composto basicamente de óxidos e hidróxidos metálicos, o qual também pode se formar espontaneamente em decorrência do contato da superfície metálica com o fluido ou pela passagem da corrente.

A diferença na utilização entre esses dois tipos de eletrólito foi investigada por Silva Neto *et al.* (2006), durante usinagem eletroquímica para a fabricação de furos em chapas de aço-válvula VV50. Os autores mantiveram constantes 12 distintas condições de cortes alterando

apenas o eletrólito entre solução aquosa de NaCl e de NaNO₃. Os resultados relativos à TRM avaliada em cada condição são mostrados na Fig. 2.27.

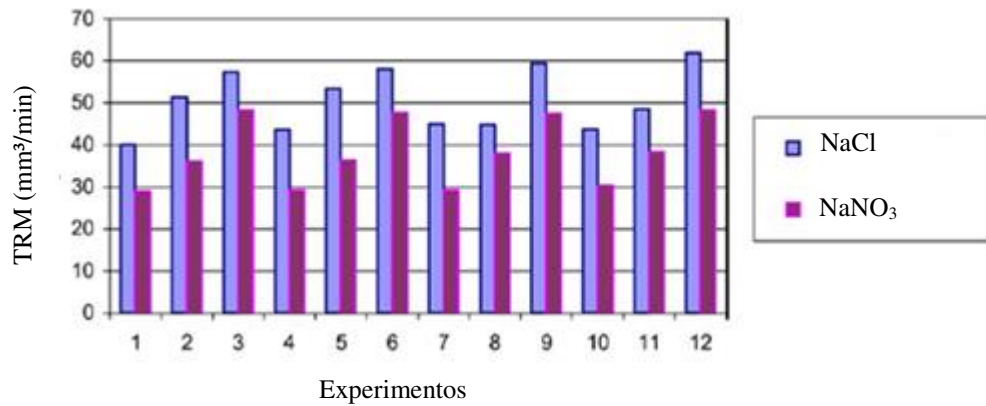


Figura 2.27 - Análise comparativa da taxa de remoção de material na utilização dos eletrólitos de NaCl e de NaNO₃ (adaptado de SILVA NETO *et al.*, 2006).

Pela Figura 2.26, verificou-se que a utilização da solução de sal NaCl em comparação à de NaNO₃ resultou em maiores volumes de material removido por unidade de tempo para todos os ensaios considerados. Os autores concluíram que as maiores taxas se devem ao caráter não-passivador do fluido, mantendo a corrente estável durante o processo e propiciando a ocorrência das reações de eletrólise do material metálico da peça.

Em relação ao nível de acidez pelo valor de pH, os eletrólitos são divididos em ácidos (pH < 7), básicos (pH > 7) ou neutros (pH próximo a 7). Como já mencionado, soluções neutras são as mais comumente utilizadas, porém, quando essas soluções não são capazes de propiciar um ambiente adequado para a dissociação ocorrer, soluções ácidas ou básicas são empregadas (LEESE; IVANOV, 2016). Soluções ácidas são preferenciais na usinagem eletroquímica de aços e suas ligas, em função da melhor solubilidade dos detritos metálicos no fluido, ao passo que para a usinagem de compósitos de carbeto de tungstênio, recomenda-se soluções alcalinas objetivando evitar a formação de camada passivadora (RAJURKAR *et al.*, 2013).

2.3.4 Usinagem eletroquímica com corrente elétrica pulsada

Um melhor controle do processo eletroquímico associado à obtenção de melhores acabamentos superficiais dos componentes fabricados, pode ser alcançada ao se considerar a utilização de corrente pulsada ao invés da contínua (KLOCKE *et al.*, 2014). Na usinagem eletroquímica por pulsos, do inglês *Pulse Electrochemical Machining* (PECM), um gerador

(fonte elétrica) fornece tensão tipicamente na forma sequencial de pulsos únicos ou pulsos agrupados (KOZAK *et al.*, 1994). A precisão do processo aumenta em função da redução no valor do *gap*, devido à intensificação das reações eletroquímicas (RAJURKAR *et al.*, 1999).

As taxas máximas de remoção de material na usinagem eletroquímica por pulsos, em comparação à contínua, são reduzidas. Porém, ao longo dos tempos de inatividade (pausas dos pulsos), é realizada a substituição do eletrólito de tal maneira que, devido ao reabastecimento do fluido, as condições eletroquímicas no *gap* são mantidas expressivamente mais constantes e uniformes, permitindo uma usinagem mais precisa e mais estável. Além disso, durante os tempos de inatividade, o nível de saturação do eletrólito ionizado é reduzido, permitindo a aplicação de densidades de corrente mais altas (KLOCKE *et al.*, 2014).

Usando a combinação de pulso adicional, baixa frequência, alta densidade de corrente contínua e um eletrodo oscilante, o processo PECM permite a usinagem em estreitas faixas de *gap* (10-50 μm) e é capaz de fornecer valores de rugosidade superficial *Ra* de até 0,03 μm . Na indústria, a usinagem eletroquímica por pulsos, portanto, pode ser aplicada com sucesso na fabricação de microestruturas complexas e ferramentas de corte produzidas de materiais de alta resistência de modo as reações corrosivas podem ser ainda mais controladas, atingindo-se precisão na faixa nanométrica (LAUWERS *et al.*, 2014).

Um estudo na área foi desenvolvido por Kock *et al.* (2003), em que seis canais foram usinados em furos pré-fabricados em uma placa de níquel com durações de pulso de 2 ns, 3 ns, 5 ns, 10 ns, 20 ns e 50 ns, mantendo as demais condições iguais em todos os casos. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Fig. 2.28, em que os valores indicados acima dos canais representam a duração do pulso em nanosegundos. Nota-se nitidamente a melhora na precisão e na qualidade das superfícies usinadas conforme o tempo de pulso é reduzido, em que os autores à associam com a redução na distância *gap*, em que as reações são fortemente ativadas promovendo uma melhora na geometria local da região usinada.

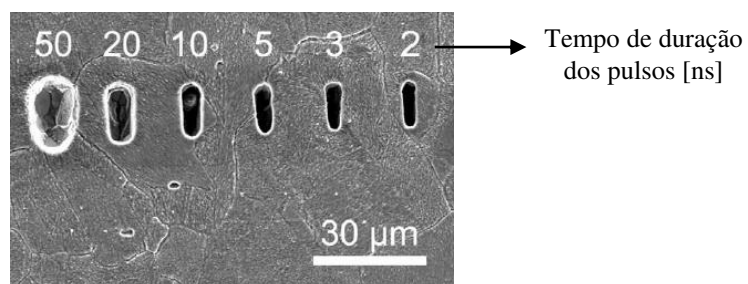


Figura 2.28 - Canais eletroquimicamente usinados em níquel com diferentes durações de pulso (KOCK *et al.*, 2003).

Kumar *et al.* (2018), contudo, alegam que durante a troca do fluido eletrolítico no momento em que os pulsos estão inativos, podem-se formar gases e gerar calor excessivo no sistema, prejudicando a eficiência do processo. Deste modo, para a aplicação do método PECM, é necessário que haja um controle preciso e rigoroso dos parâmetros elétricos selecionados, especialmente o tempo de pulso.

2.3.5 Curva de polarização

A polarização pode ser definida como uma mudança no potencial do estado de equilíbrio em resposta ao fluxo passante de corrente (ARDILA, 2013). O estudo da corrosão eletroquímica (eletrólise) de um sistema eletrólito-metal pode ser obtido por meio da sua curva de polarização, que possibilita determinar graficamente o comportamento do material investigado frente às condições adotadas em relação ao fluido eletrolítico selecionado e à montagem programada, por meio da relação entre corrente (densidade de corrente) e tensão elétrica.

Apresentando-se em duas configurações, o ensaio para a obtenção da curva de polarização pode ser da forma potenciodinâmica ou potencioestática, de modo que a diferença entre ambas consiste na variação contínua da tensão em função do tempo existente na primeira e ausente na segunda (IVANOV *et al.*, 2015). Os principais componentes para o ensaio consistem em um eletrodo de referência (de potencial constante e conhecido), um eletrodo de trabalho (referente à amostra do material analisado), um eletrodo auxiliar ou contra-eletrodo (atua como o cátodo) e um potenciostato conectado aos três eletrodos e também a um sistema de aquisição e processamento de dados. Um esquema do sistema montado é mostrado na Fig. 2.29.

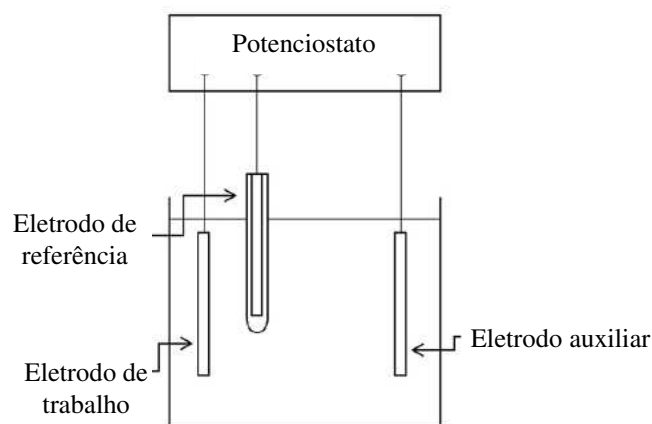


Figura 2.29 - Configuração experimental de polarização (adaptado de IVANOV *et al.*, 2015).

O potencial entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência, associado à corrente circundante pelo eletrodo auxiliar, definem as características de corrosão da amostra (ARDILA, 2013). Como resultado, a modificação nos valores de potencial provoca a formação de uma película de produtos da eletrólise (óxidos e hidróxidos), fenômeno este conhecido como passivação, o qual é capaz de melhorar a resistência à corrosão dos materiais. De modo a investigar e identificar o comportamento do sistema definido pelo metal liga de titânio Ti-13Nb-13Zr e o meio solução salina balanceada de Hank's (eletrólito), Assis e Costa (2007) ensaiaram a curva de polarização anódica cuja representação gráfica é exibida na Fig. 2.30.

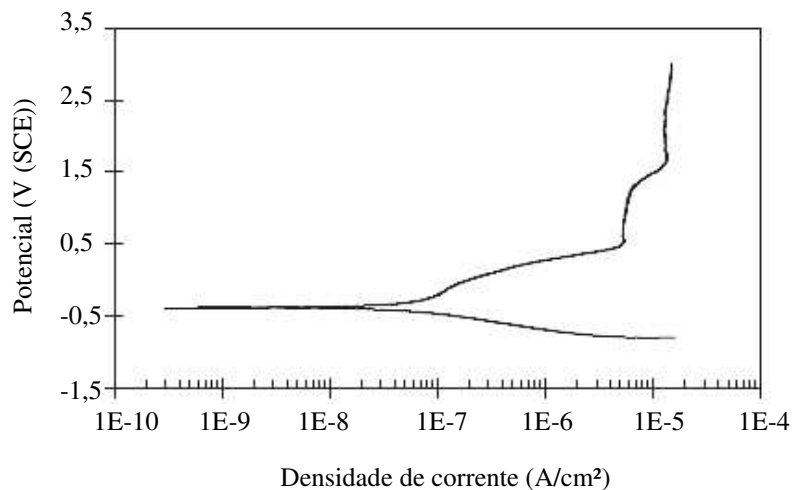


Figura 2.30 - Curva de polarização potenciodinâmica para a liga Ti-13Nb-13Zr (adaptado de ASSIS e COSTA, 2007).

Segundo os autores, foram selecionados um eletrodo saturado de Calomelano (SCE) como eletrodo de referência, um fio de platina como eletrodo auxiliar e uma faixa de tensão de - 0,8 V a 3,0 V, a uma taxa de 1 mV/s. O início da curva compreendido entre os valores de potencial de - 0,8 V e -0,4 V é caracterizado como uma etapa de estabilização do sistema eletrolítico, a chamada região catódica (abaixo do valor do potencial de corrosão). A partir da tensão igual a - 0,4 V, definido como potencial de corrosão (ou potencial de ativação), inicia-se o efetivo desenvolvimento das reações de dissociação anódica do sistema, definidas pelo contínuo aumento na intensidade da corrente, a qual se comporta em crescimento até valores próximos de tensão igual a 0,5 V. A partir deste valor, a corrente se mantém basicamente constante com o aumento da tensão, indicando um comportamento passivador do material.

De acordo com Datta (1993), na região de passivação a superfície da peça é recoberta por um filme protetor de óxidos (no caso do titânio e suas ligas, geralmente TiO_2) evitando maiores

taxas de dissociação do material base, de modo que a usinagem passa a ser direcionada para a dissociação dessa camada protetora. Com o aumento nos valores de potencial imposto pelo potenciostato até em torno de 1,3 V, o filme isolante é fragmentado e a corrente retorna a crescer, recuperando-se o contato elétrico e a retomada na dissociação do metal. Na tensão de 1,7 V, a estabilização da corrente é outra vez sucedida, indicando que uma nova camada passivada, mais macia e porosa em comparação à formação da primeira, mas não necessariamente de menor ou maior espessura, foi formada, e assim a curva se segue.

Speck e Fraker (1980) afirmam que a continuação da curva pode ser caracterizada pelas sucessivas formações e rompimentos de camadas passivadas à medida que a tensão elétrica cresce acompanhado do desenvolvimento das reações de eletrólise do material. Outra possibilidade consiste em resultar na corrosão por pites, em que os valores de tensão atingidos provocam o surgimento de cavidades profundas que podem atravessar toda a espessura do material, indicando uma condição agressiva de ataque eletroquímico, em que a peça danificada deve ser descartada.

2.3.6 *Micro-ECM*

Em conformidade à expansão na miniaturização de peças e componentes mecânicos, o desenvolvimento do processo em microescala é capaz de promover a obtenção de características e estruturas geométricas bidimensionais ou tridimensionais na ordem micrométrica ou até mesmo nanométrica de trabalho (HUIQIAN *et al.*, 2008). Baseando-se no mesmo princípio de dissociação anódica e de processamento da usinagem eletroquímica, na micro-ECM, além da redução nos valores dos parâmetros de corte, o controle mais rigoroso para o direcionamento da remoção de material, de modo a concentrar a corrente elétrica na região a ser atacada sem que haja possíveis dissipações, é fundamental para garantir a precisão do processo (SAXENA *et al.*, 2018).

Na Figura 2.31 é apresentada a diferença ao se considerar um revestimento com material isolante elétrico nas laterais da ferramenta, restringindo a dispersão de corrente elétrica, em que o deslocamento do eletrodo em direção à superfície metálica promove uma usinagem mais precisa e sem sobrecortes. Dentre as vantagens, Bhattacharyya *et al.* (2004) afirmam ser possível obter melhores resultados quanto a integridade superficial das superfícies usinadas associados à maiores taxas de remoção de material durante o processo em microescala, além de um menor tempo de usinagem, elevada confiabilidade da fabricação e aceitabilidade ambiental,

permitindo com maior facilidade o processamento de materiais quimicamente resistentes como ligas de cobre e de titânio.

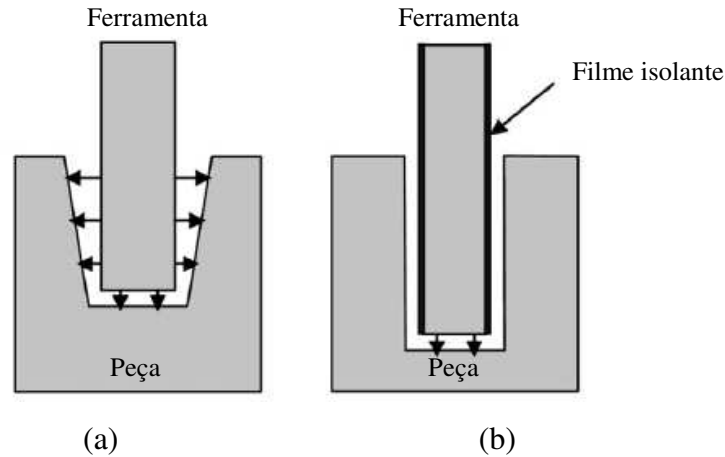


Figura 2.31 – Diferença na precisão de usinagem ao (a) não considerar e (b) considerar o isolamento elétrico das superfícies laterais da ferramenta (adaptado de LIU *et al.*, 2017).

Na Tabela 2.4 são apresentadas as principais diferenças encontradas entre os processos em escala macro e micrométrica de usinagem eletroquímica.

Tabela 2.4 - Comparação entre os processos de ECM e micro-ECM (adaptado de BHATTACHARYYA *et al.*, 2004).

Principais propriedades de usinagem	Usinagem eletroquímica (ECM)	Microusinagem eletroquímica (micro-ECM)
Potencial elétrico	10 V a 30 V	< 10 V
Corrente elétrica	150 A a 10 000 A	< 1 A
Densidade de corrente elétrica	20 A/cm ² a 200 A/cm ²	75 A/cm ² a 100 A/cm ²
Fonte de energia	Contínua ou Pulsada	Pulsada
Vazão do eletrólito	10 m/s a 60 m/s	< 3 m/s
Tipo de eletrólito	Solução salina	NaCl ou solução ácida / básica
Dimensão da ferramenta	Grande a média (> 1 mm)	Micro (< 1 mm)
Dimensão do <i>gap</i>	100 μm a 600 μm	5 μm a 50 μm
Taxa de remoção de material	0,2 mm/min a 10 mm/min	5 μm/min
Precisão de processo	± 0,1 mm	± 0,02 mm a 0,1 mm
Acabamento superficial (<i>Ra</i>)	0,1 μm a 1,5 μm	0,05 μm a 0,4 μm

Na Figura 2.32 são exibidos alguns exemplos de fabricação por meio da micro-ECM com pulsos ultra-curtos, destacando a capacidade de hibridismo de processos convencionais (microfresamento na Fig. 2.31a e microfuração na Fig. 2.31b) com a usinagem eletroquímica.

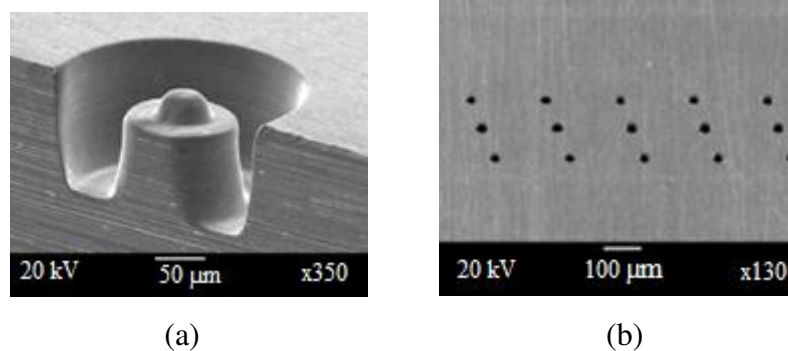


Figura 2.32 - Em (a) microsuperfície semiesférica com 60 µm de diâmetro usinada no topo de um cilindro por microfresamento eletroquímico e em (b) matriz de furos com diâmetro de 40 µm usinados por microfuração eletroquímica com múltiplos eletrodos (KIM *et al.*, 2005).

Um estudo referente à fabricação de uma matriz de microcanais por meio da micro-ECM pode ser encontrado no trabalho de Kunar e Bhattacharyya (2019). Investigando a influência na variação dos parâmetros tensão elétrica, concentração e vazão do eletrólito, em que foi utilizada uma solução contendo uma mistura entre NaCl e NaNO₃, na Fig. 2.33 é apresentada uma imagem dos microcanais produzidos na condição ótima, com tempo de usinagem de 60 s.

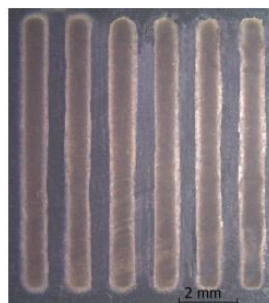


Figura 2.33 - Matriz de microcanais usinados por meio da micro-ECM (KUNAR e BHATTACHARYYA, 2019).

De acordo com os resultados obtidos, o aumento da tensão, selecionada entre 6 V a 12 V, provocou um aumento na densidade de corrente e na remoção de material, produzindo um maior sobrecorte lateral nos canais fabricados e um acúmulo de bolhas de gás e de produtos oriundos das reações sob a superfície da peça. O mesmo comportamento foi observado durante a variação na concentração do eletrólito entre os valores de 20 g/L a 35 g/L, em que maiores concentrações resultaram em instabilidade no processo de dissociação anódica do material metálico. Em relação à vazão do fluido, menores valores de rugosidade foram encontrados nos canais ao adotar vazões de 5,35 m³/h em comparação aos valores de 2,35 m³/h e 4,35 m³/h, uma vez que

possibilitou eficientemente a remoção das impurezas sob a superfície. Assim, determinaram que um menor valor de tensão e de concentração do eletrólito aliados à maiores vazões da solução, resultou na usinagem de microcanais mais uniformes com menores sobrecortes e melhores acabamentos, alcançando um Ra próximo de $0,010 \mu\text{m}$.

2.4 O processo híbrido abrasivo-eletroquímico

Buscando vincular os benefícios entre as diferentes tecnologias, os processos híbridos de fabricação foram desenvolvidos como técnicas promissoras, especialmente quando aplicados a materiais de difícil usinagem, como as cerâmicas e as ligas de titânio (ZHU *et al.*, 2011), impulsionados principalmente pelas demandas do setor industrial. Lauwers *et al.* (2014) definem a usinagem híbrida como a interação simultânea e controlada de mecanismos e/ou fontes de energia para remoção de material, de modo a desempenhar um efeito significativo na eficiência do sistema.

Segundo Rajurkar *et al.* (2013), a usinagem por meio do processo eletroquímico vem sendo combinada com diferentes métodos mecânicos de fabricação para a obtenção de melhores resultados em termos de remoção de material, acabamento superficial e confiabilidade de processamento, possibilitando serem satisfeitas estreitas faixas de tolerância. Tal combinação possibilita a ampliação na gama de materiais processados eletroquimicamente e beneficia a remoção dos óxidos e hidróxidos produtos das reações por meio da ação da ferramenta de corte (SAXENA *et al.*, 2018). Entre esses processos, encontra-se a retificação eletroquímica, do inglês *Electrochemical Grinding* (ECG).

Considerado como um processo eficiente na usinagem de materiais condutores de eletricidade de forma econômica e precisa, a retificação eletroquímica consiste na combinação entre a ação eletroquímica da usinagem eletroquímica e a ação mecânica abrasiva da retificação para remoção de material (HASÇALIK; ÇAYDAS, 2007). Por meio da ECG, aliam-se menores taxas de consumo energético e desgaste das partículas abrasivas ao aumento de vida da ferramenta (redução nas forças de corte mecânicas), possibilitando a obtenção de geometrias complexas com uma elevada qualidade e integridade superficial, distorção insignificante e livre de rebarbas, tensão residual e danos por calor (RUSZAJ *et al.*, 2018; SAXENA *et al.*, 2018).

Realizado no interior de uma cuba eletrolítica, durante o ensaio abrasivo-eletroquímico a distância *gap* selecionada deve ao mesmo tempo ser dimensionada para que a ferramenta

abrasiva se limite a atuar no rompimento do filme de óxidos formado sob a superfície da peça e possibilite o fluxo de eletrólito entre os eletrodos para a ocorrência das reações. Conforme Ge *et al.* (2019) esclarecem, esse valor deve ser similar ou ligeiramente menor que a altura dos abrasivos protuberantes do rebolo, para que o contato das partículas abrasivas se limite à espessura da camada passivada. Maksoud e Brooks (1995) afirmam que esse valor varia em torno de 0,025 mm, porém é dependente das particularidades de cada projeto.

Na Figura 2.34a é mostrado um esquema do processo ECG, em que peça e ferramenta se encontram conectados aos polos de uma fonte externa de tensão de corrente contínua, sendo a primeira ao polo positivo (ânodo) e a segunda ao negativo (cátodo). Na Figura 2.34b é exibida uma representação do processo de remoção de material na ECG, em que se destaca a ação abrasiva direcionada à remoção do filme de óxidos.

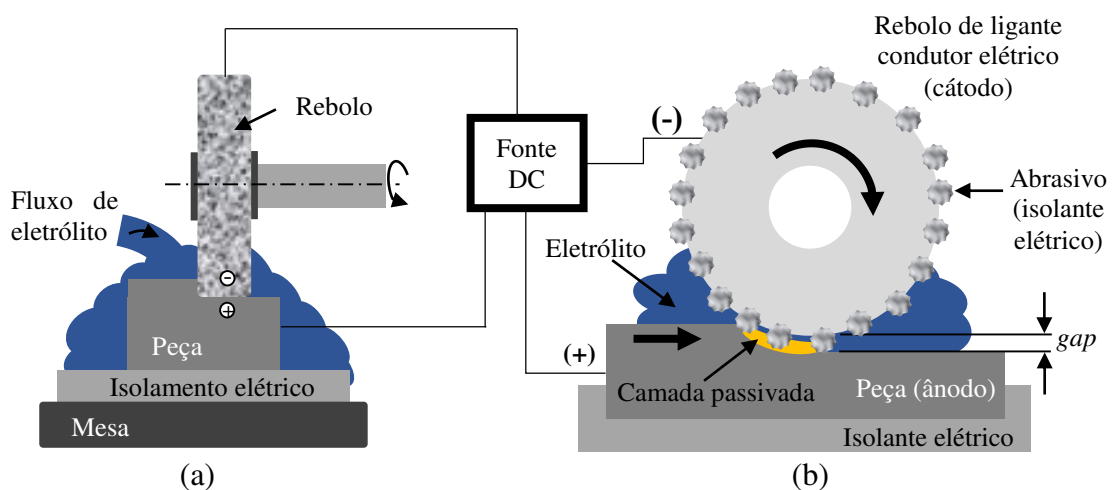


Figura 2.34 - Esquema representativo em (a) da retificação eletroquímica (adaptado de HASÇALIK e ÇAYDAS, 2007) e em (b) da ação do abrasivo durante a remoção de material (Fonte: FIOCCHI, A.)

2.4.1 Mecanismo de remoção de material da retificação eletroquímica

Seguindo os mesmos princípios da eletrólise, para o ensaio de usinagem por retificação eletroquímica, os eletrodos peça (ânodo) e ferramenta (cátodo) devem ser conectados aos polos de uma fonte externa de tensão de corrente contínua, e serem eletricamente isolados do sistema para proteção ao circuito elétrico. Destaca-se que a energização do rebolo pode ser facilitada por meio da utilização de uma escova coletora de material condutor, em que a tensão é direcionada à escova e então repassada, por contato direto, à ferramenta de corte.

O rebolo, acoplado a um eixo de elevada rotação, é deslocado ao longo de uma trajetória programada, estimulando a ocorrência das reações eletroquímicas pela aproximação da superfície da peça, aliado à vazão da solução eletrolítica no circuito para o transporte da corrente elétrica, agindo efetivamente, mas não majoritariamente, no processo de remoção de material. Os abrasivos são direcionados a atuar na remoção da camada passivada formada pelos produtos das reações de dissociação anódica para remoção de material via ataque eletroquímico, por meio da seleção de *gaps* específicos associados à espessura da região de interesse a ser removida. Com isto, expõe-se a superfície não atacada recoberta pelo filme isolante, promovendo concomitantemente a ocorrência de novas etapas de usinagem eletroquímica (SAXENA *et al.*, 2018), resultando em um ganho de produtividade. Geralmente, a quebra do filme de óxidos é indicada por picos irregulares de corrente, ocorrência de faíscas ou um pequeno ruído (LEESE e IVANOV, 2016).

Em outras palavras, a função do rebolo durante o processo híbrido abrasivo-eletroquímico é a de romper e remover o filme isolante aderido à peça, expondo a face metálica, promovendo assim a passagem de corrente local para que seja continuado o ataque eletroquímico na região exposta, o qual havia sido inibido pela formação de uma camada isolante superficial. Por se concentrar na eliminação da camada passivada, de acordo com Curtis *et al.* (2009), a participação da ação abrasiva de remoção de material global do processo é pequena, variando em torno de 5 % a 10 %, sendo a maior porcentagem relacionada à ação eletroquímica (aproximadamente 90 %).

Ressalta-se que o núcleo da ferramenta abrasiva deve ser condutor (ligante metálico) e o abrasivo isolante, para que a ferramenta seja capaz de ao mesmo tempo completar o circuito elétrico para o desenvolvimento das reações sem que haja a ocorrência de curto-circuito durante o contato entre a partícula abrasiva e a camada passivadora (ZHU *et al.*, 2001). Kuppuswamy (1976) enfatiza o papel das partículas abrasivas quanto ao transporte do eletrólito na região do *gap*, uma vez que os vazios no rebolo são preenchidos com fluido durante o bombeamento, e aponta que os abrasivos geralmente utilizados são o diamante, óxido de alumínio e carbetos de silício, cujas concentrações e granulometrias afetam diretamente a taxa de remoção de material.

Em resumo, o mecanismo de remoção de material pode ser dividido em três fases, conforme esquematizado na Fig. 2.35.

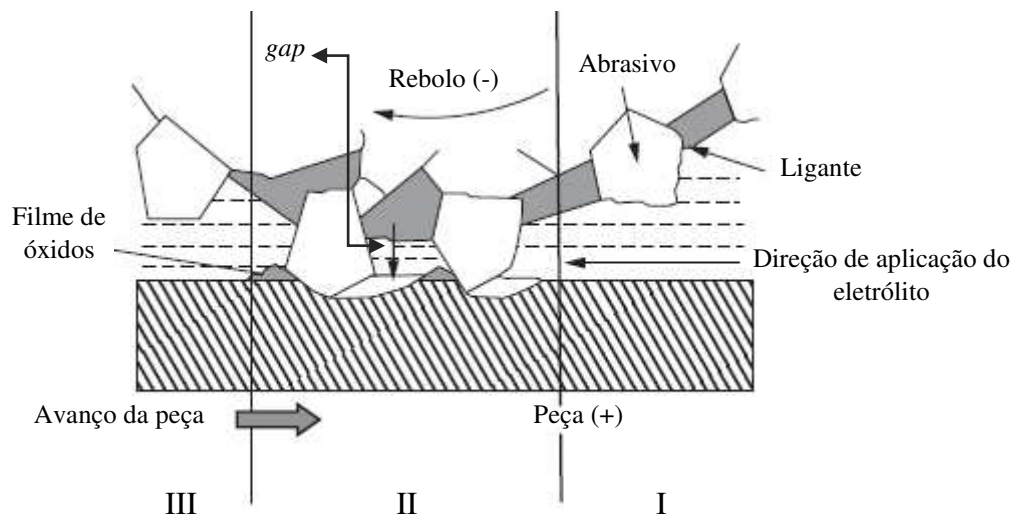


Figura 2.35 - Mecanismo de remoção de material na ECG (adaptado de BHATTACHARYYA e DOLOI, 2020).

Bhattacharyya e Doloi (2020) explicam que na fase I, o eletrólito é bombeado na região do *gap* à medida em que o rebolo rotaciona a uma velocidade constante. A remoção de material ocorre praticamente devido à ação eletroquímica de dissociação anódica da base metálica. Os produtos e os gases oriundos das reações são responsáveis por contaminar o eletrólito, de modo que um filme de óxidos e hidróxidos, caracterizado por restringir a condutividade elétrica local, é formado sob a peça. Com a redução do valor do *gap* em função da espessura da camada passivada, a ferramenta se aproxima da superfície do material, havendo uma queda na taxa de remoção em decorrência do menor fluxo de corrente. O fim da fase I é caracterizado pelo contato entre os abrasivos protuberantes do rebolo e a camada de óxidos na superfície da peça.

Na fase II, os abrasivos protuberantes do rebolo são responsáveis por remover material em forma de pequenos cavacos do filme passivador ao mesmo tempo que devem manter um distanciamento entre a ferramenta e a superfície metálica da peça para que seja evitado curto-circuito. Após a eliminação da camada de óxidos, o valor do *gap* aumenta. A rotação da ferramenta estimula a vazão de eletrólito de modo que a região recém exposta da peça é atacada pelo fluxo de corrente, promovendo a dissociação anódica do material. Essa fase é definida pela combinação da ação mecânica e eletroquímica para remoção do filme de óxidos, se encerrando quando o rebolo perde o contato com a peça. A última fase (III) é caracterizada por menores taxas de remoção de material e consiste na etapa de acabamento, em que possíveis riscas ou rebarbas resultantes da fase anterior são removidos exclusivamente por ação eletroquímica.

2.4.2 Acabamento superficial

Durante a usinagem híbrida, os parâmetros de corte elétricos e mecânicos encontram-se inter-relacionados, influenciando diretamente na taxa de remoção de material e consequentemente na qualidade do acabamento das superfícies usinadas. A tensão elétrica e a velocidade de avanço variam proporcionalmente à quantidade de material removido na peça, uma vez que promovem a obtenção de maiores densidades de corrente no *gap* e a remoção do filme passivador formado sob a superfície do material (BHATTACHARYYA; DOLOI, 2020).

GE *et al.* (2019) afirmam que com a combinação adequada dos parâmetros, o equilíbrio entre as diferentes fontes de energia possibilita a eliminação dos óxidos, hidróxidos e impurezas provenientes das reações eletroquímicas, os quais podem se aderir à base da peça. Como resultado, são produzidas superfícies mais homogêneas e planas. A comparação no aperfeiçoamento do acabamento obtido ao se considerar o processo híbrido comparativamente a uma superfície apenas atacada eletroquimicamente é mostrada na Fig. 2.36.

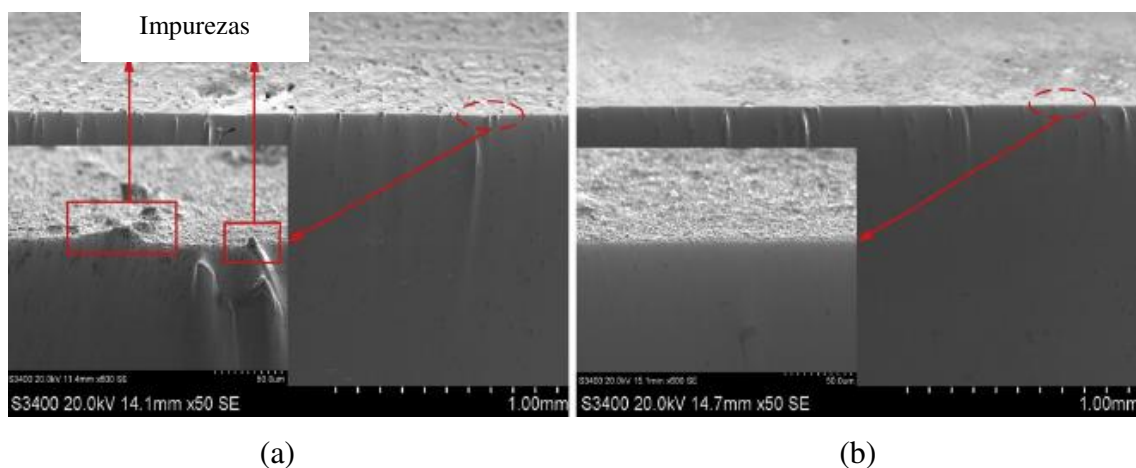


Figura 2.36 - Imagens em MEV de uma superfície usinada em (a) por ECM e em (b) por ECG (adaptado de GE *et al.*, 2019).

A retificação eletroquímica também pode ser utilizada como etapa de pós-processamento em superfícies pré-usinadas para melhoria do acabamento superficial. Hasçalik e Çaydas (2007), por exemplo, investigaram a usinagem por descargas elétricas (EDM) em peças da liga Ti-6Al-4V, a qual resultou na formação de uma camada branca característica do processo sob a superfície da peça. Os autores avaliaram a rugosidade obtida, a qual forneceu valores de R_a na faixa de $5,79 \mu\text{m}$. Objetivando reduzir tais valores, foi considerado a aplicação da ECG nas

superfícies pós-EDM, variando-se a tensão aplicada. Os resultados obtidos graficamente entre o aumento da tensão e a rugosidade final das peças são apresentados na Fig. 2.37.

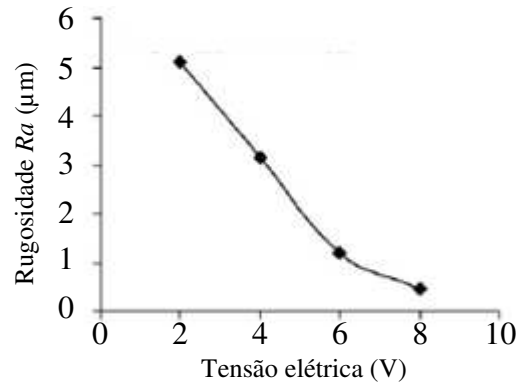


Figura 2.37 - Influência da tensão elétrica na rugosidade Ra em peças de Ti-6Al-4V usinadas pelo processo de retificação eletroquímica (adaptado de HASÇALIK e ÇAYDAS, 2007).

Pela Figura 2.37, nota-se uma queda acentuada na rugosidade com o aumento da tensão, atingindo-se valores de Ra próximos a $0,45 \mu\text{m}$. Em maiores valores de potencial, as reações eletroquímicas de dissociação anódica do material se intensificam devido ao maior fluxo de corrente no *gap*, promovendo a eliminação dos danos estruturais causados pelo processo de descargas elétricas à superfície. Os autores exaltaram o parâmetro tensão elétrica como responsável por aproximadamente 92 % no aprimoramento do acabamento superficial.

Todavia, Qu *et al.* (2015) alertam quanto à adoção dos valores de tensão elétrica durante um ensaio de ECG, de modo que as definições sobre o que seja um valor pequeno ou grande para a tensão dependem do sistema avaliado, das condições adotadas e da curva de polarização do material. Baixas tensões induzem a remoção de material por ação predominantemente mecânica, resultando frequentemente em curtos-circuitos e danificando a superfície da peça. Elevados valores de tensão, por outro lado, podem intensificar a formação de óxidos, hidróxidos e impurezas, bem como a aglomeração de tais partículas aderidas sob a superfície do material atacado, prejudicando a atuação do rebolo e afetando negativamente o acabamento.

Ge *et al.* (2019) afirmam que a necessidade de se impor valores limite também deve ser aplicada à V_w , de modo que uma seleção eficiente consiste no equilíbrio entre o deslocamento do eletrodo com a taxa de dissociação anódica do material atacado. Em menores avanços, a remoção se dá predominantemente devido à ação eletroquímica, resultando em uma distância *gap* superior à altura dos abrasivos protuberantes e prejudicando a ação do rebolo em atuar na remoção da camada passivadora. Em valores elevados de V_w , por outro lado, verifica-se a

ocorrência de faíscas e arranhões provocados pelo contato intermitente das partículas abrasivas na base metálica, em virtude do tempo insuficiente para uma adequada dissociação, danificando a qualidade final do acabamento superficial.

2.4.3 A escala micro

Configurando-se como uma variação do processo híbrido, está o seu desenvolvimento em escala micrométrica de trabalho, combinando os conceitos encontrados para microrretificação e microusinagem eletroquímica. Pesquisas relacionadas a este tema ainda são pouco desenvolvidas e abordadas na literatura. Os estudos de Gaikwad e Joshi (2008) e Sapre *et al.* (2013), entretanto, procuram apresentar particularidades sobre a micro-ECG.

À medida em que a escala de trabalho é reduzida, características do rebolo como espessura e distribuição das partículas abrasivas podem desempenhar um papel mais significativo durante o processo, uma vez que atuam diretamente na remoção da camada passivada, em que menores valores de *gap* são adotados quando comparado à ECG (GAIKWAD, JOSHI, 2008). Geralmente, esse valor varia na faixa de 0,005 mm a 0,025 mm e a tensão elétrica se encontra limitada a máximos 9 V (SAPRE *et al.*, 2013).

Ainda de acordo com Sapre *et al.* (2013), a vazão do eletrólito também desempenha um papel importante durante a micro-ECG. Com o aumento no bombeamento do fluido eletrolítico na região do *gap*, o transporte da corrente é intensificado de modo que uma maior quantidade de íons eletricamente carregados se torna disponível para que sejam realizadas as reações de dissociação anódica do material, resultando em maiores taxas de remoção. Somada à rotação da ferramenta, tal combinação pode provocar turbulência no circuito elétrico, desfavorecendo o ataque eletroquímico e conseqüentemente o acabamento superficial. Vazões insuficientes de eletrólito, entretanto, podem prejudicar a eliminação dos produtos oriundos das reações aderidos sob a base metálica da peça, resultando em superfícies mais rugosas.

Deste modo, a etapa de remoção de material durante a microrretificação eletroquímica pode ser definida pela interação entre ação eletroquímica (referente a dissociação anódica da peça), ação abrasiva (relacionada a remoção mecânica da camada passivadora na superfície da peça) e ação erosiva (relativa à eliminação dos vestígios e impurezas provenientes da camada passivadora pelo bombeamento do eletrólito), segundo esquema representado na Fig. 2.38.

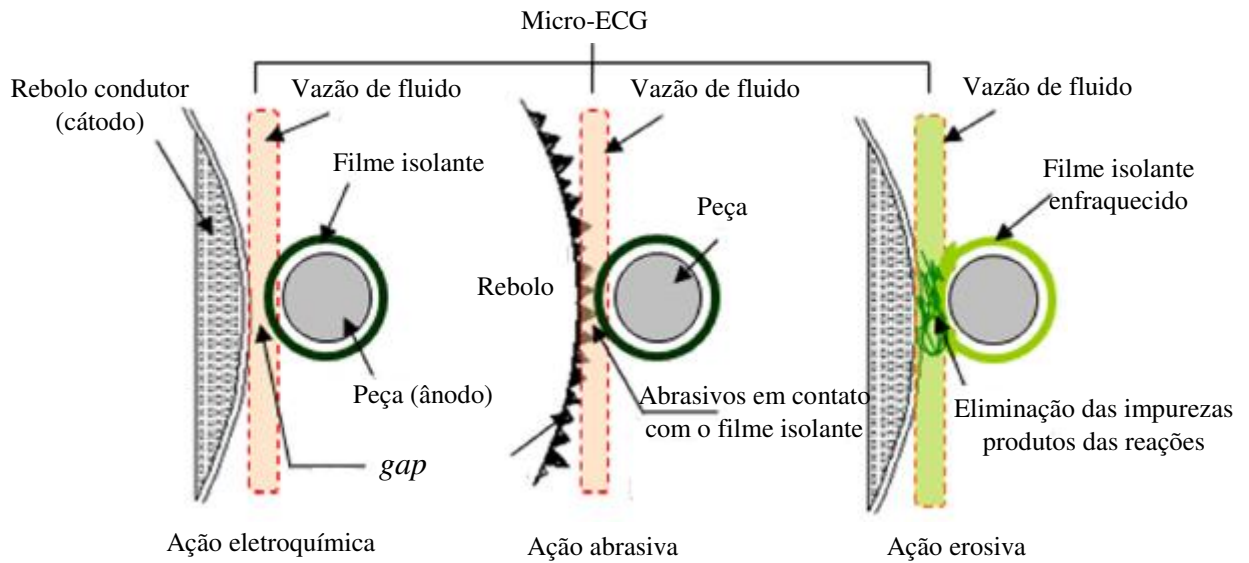


Figura 2.38 - Contribuintes para a remoção de material durante a micro-ECG (adaptado de SAPRE *et al.*, 2013).

Em relação às aplicações, Sapre *et al.* (2013) afirmam que a micro-ECG pode ser eficientemente aplicada para a obtenção de características micrométricas como canais e roscas em equipamentos cirúrgicos e implantes ortopédicos e furos para injeção de combustível em automóveis e aeronave. Ela também está relacionada à fabricação de lâminas e estruturas alveolares para turbinas e microturbinas, conforme exibido na Fig. 2.39.

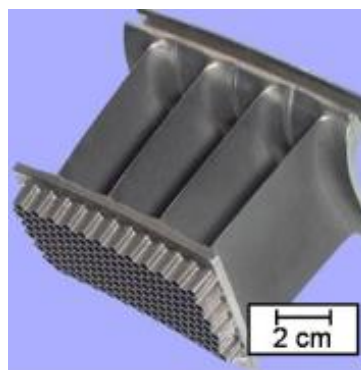


Figura 2.39 - Estrutura alveolar usinada por micro-ECG (LAUWERS *et al.*, 2014).

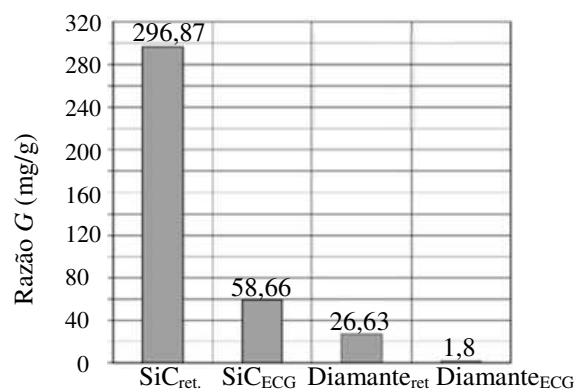
2.4.4 Estado da técnica

O desenvolvimento do processo híbrido entre abrasão e eletroquímica trata-se de um método de fabricação recente, em que as pesquisas iniciais datam a partir do final de 1970, considerando uma escala macrométrica de trabalho com rebolos de diâmetros entre 150 mm a

250 mm (CURTIS *et al.*, 2009). Os autores afirmam, entretanto, haver uma tendência à redução diametral das ferramentas abrasivas com o passar dos anos em conformidade aos avanços tecnológicos na área de microfabricação, somada a um controle numérico mais rigoroso.

Kuppuswamy (1976) investigou o desempenho do processo de retificação eletroquímica em peças de carbetto de tungstênio ao variar o material abrasivo (carbetto de silício, alumina e diamante) da ferramenta de corte, considerando uma solução aquosa de sal NaNO_3 de concentração 10 %. Conforme os resultados obtidos, o rebolo com abrasivos de diamante apresentou uma elevada eficiência Faraday (parâmetro avaliativo), definida pela razão entre as taxas de remoção eletroquímica real e teórica, com um valor aproximado de 80 %, ao passo que para os rebolos de SiC e Al_2O_3 , foram encontrados valores abaixo de 6 %.

Zaborski *et al.* (2004) avaliaram o desgaste da ferramenta de corte considerando a utilização de diferentes métodos de usinagem (retificação mecânica “ret.” e retificação eletroquímica “ECG”) e de abrasivos (carbetto de silício SiC e diamante) durante a usinagem de peças da liga de titânio WT3-1. Na Figura 2.40 são apresentadas as medidas das massas da ferramenta antes e após a usinagem obtidas pelos autores para avaliação do desgaste. Verificou-se que em relação aos abrasivos, os rebolos de diamante apresentaram maior durabilidade indicando significativamente menores valores da razão G. Em relação ao processo de usinagem, a adoção do processo híbrido frente ao puramente abrasivo apresentou menores desgastes independentemente do abrasivo considerado (cerca de 6 vezes para o SiC e 15 vezes para o diamante), indicando a eficiência da combinação abrasivo-eletroquímica, a qual possibilitou drasticamente a redução dos esforços mecânicos, aumentando a vida útil da ferramenta.



Métodos de retificação avaliados

Figura 2.40 - Efeito do método de retificação (puramente abrasiva e eletroquímica) na razão G em rebolos com abrasivos de SiC e de diamante (adaptado de ZABORSKI *et al.*, 2004).

Curtis *et al.* (2009) avaliaram o emprego do processo híbrido ECG para o aprimoramento na qualidade do acabamento de canais pré-usinados em amostras da superliga de níquel *Udimet* 720, relacionados à fabricação de lâminas de compressores e turbinas para a indústria aeroespacial. Para tanto, compararam o desempenho ao se utilizar diferentes tipos de ligantes na ferramenta abrasiva, o resinóide (revestido com cobre), o metálico (à base de bronze) e o eletrolítico (níquel). Após análise dos resultados, concluíram que os ligantes eletrolíticos possibilitaram um melhor desempenho durante a usinagem ponderando-se a relação entre efetividade para a remoção de material e desgaste da ferramenta.

Baseando-se segundo os princípios considerados para a microrretificação eletroquímica, embora não definida pelos autores como tal, Zhu *et al.* (2011) propuseram a usinagem de furos previamente fabricados de diâmetro D_0 em blocos de aço inoxidável. Para tanto consideraram uma ponta esférica metálica rotativa de diâmetro igual a $500\ \mu\text{m}$, revestida com abrasivos de diamante, atuando mecânica e eletroquimicamente na remoção de material objetivando a eliminação de rebarbas e melhora na qualidade do acabamento. Ao final, os furos resultantes apresentavam um diâmetro médio D_1 próximo de $600\ \mu\text{m}$. Uma representação esquemática do processo investigado é mostrada na Fig. 2.41a.

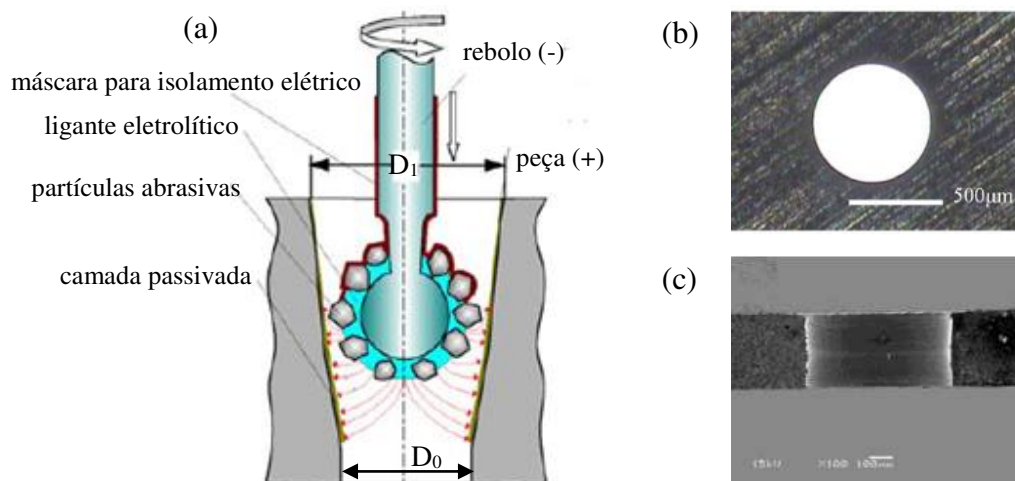


Figura 2.41 - Diagrama esquemático do processo em microescala combinado de abrasão-eletroquímica proposto pelos autores (adaptado de ZHU *et al.*, 2011).

Variando os valores de tensão na faixa de 3,5 V a 7,5 V e velocidade de avanço da ferramenta entre $4\ \mu\text{m/s}$ a $6\ \mu\text{m/s}$, os autores objetivaram determinar a condição que fornecesse o menor valor de Ra . Em maiores tensões elétricas e menores avanços, verificou-se remoção de material basicamente por ação eletroquímica, produzindo significativo sobrecorte lateral. Em

maiores avanços e menores tensões elétricas, os abrasivos entram prematuramente em contato com a superfície da peça, resultando em um aumento na profundidade usinada pela ação mecânica e um excessivo desgaste da ferramenta de corte, ocasionando frequentemente curtos-circuitos. O melhor acabamento, com Ra igual a $0,21 \mu\text{m}$, foi obtido para a condição de $4,5 \text{ V}$ e $5,5 \mu\text{m/s}$. Nas Figuras 2.41b e 2.41c são exibidas, respectivamente, as imagens em MEV da entrada do furo e em corte transversal resultantes desta condição.

Qu *et al.* (2015) compararam a utilização de pontas montadas com abrasivos de diamante soldados aos normalmente eletrodepositados durante a retificação eletroquímica em peças de Inconel 718. Especificamente para o material investigado, os autores verificaram um maior desprendimento das partículas abrasivas quando eletrodepositadas na ferramenta, sendo facilmente removidas durante a usinagem, ao passo que a utilização de abrasivos soldados aumentou a durabilidade da ferramenta de 15 horas para 50 horas.

Mogilnikov *et al.* (2016) investigaram a preparação de superfícies da liga WC-Ni presentes em discos de suporte para dispositivos elétricos via DECMG, do inglês “*Diamond ECM Grinding*”, segundo esquema representado na Fig. 2.42a. Com a combinação adequada dos parâmetros, os autores destacaram a eficiência da utilização do processo eletroquímico simultaneamente ao abrasivo de retificação resultou em peças livres de marcas de queima e de microtrincas superficiais, conforme exibido na Fig. 2.42b, com rugosidade Ra alcançando valores de $0,32 \mu\text{m}$.

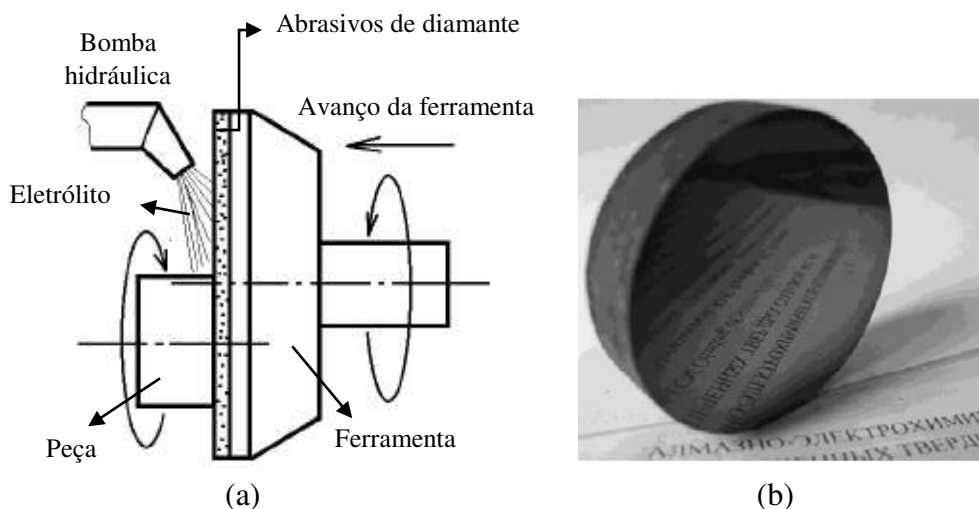


Figura 2.42 - Em (a) esquema do processo utilizado para ECG e em (b) superfície final retificada eletroquimicamente (adaptado de MOGILNIKOV *et al.*, 2016).

Ge *et al.* (2019) combinaram a técnica *creep-feed*, caracterizada por empregar elevadas profundidades de corte a baixas velocidades de avanço, ao desenvolvimento do processo de retificação eletroquímica para a usinagem da liga de níquel K423 A. Os autores compararam a eficiência do processo híbrido em relação aos puros de retificação tangencial *creep-feed* e usinagem eletroquímica e concluíram que a taxa de remoção de material e a rugosidade superficial das superfícies usinadas foram aprimoradas ao associar a dissociação anódica do material com a ação abrasiva do rebolo. Na Figura 2.43 são exibidas as imagens em MEV obtidas após cada um dos três processos investigados, utilizadas para a análise do acabamento superficial.

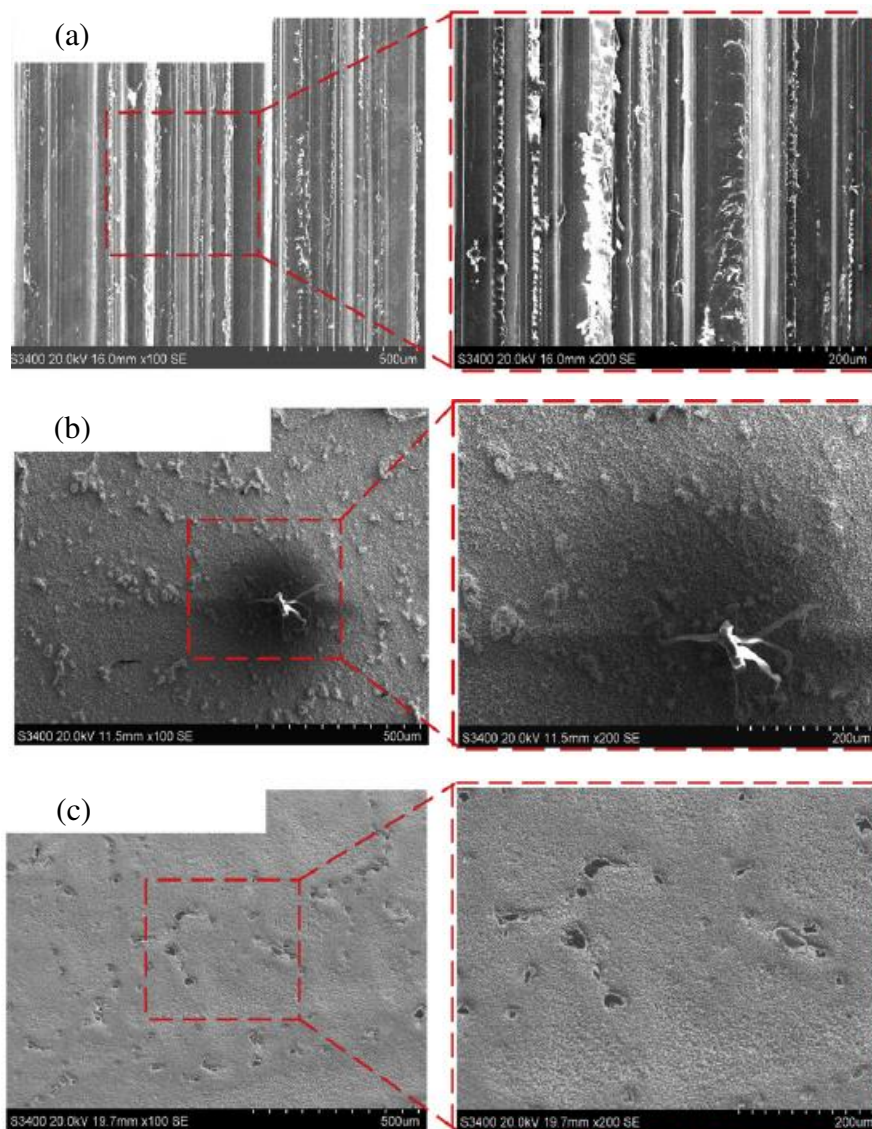


Figura 2.43 - Imagens em MEV das superfícies usinadas por meio do processo de (a) retificação *creep-feed* (b) usinagem eletroquímica (c) hibridismo entre ambos (GE *et al.*, 2019).

Na Figura 2.43a é apresentada a superfície usinada pelo processo puramente abrasivo, em que se nota as marcas oriundas do deslocamento das partículas abrasivas resultando em sulcamento do material em direção às bordas dos sulcos ao longo de toda a região, fornecendo uma superfície significativamente rugosa. Na Figura 2.43b, sob a superfície pós usinagem eletroquímica verificou-se uma quantidade expressiva de micropartículas e impurezas incrustadas, resultando em topografias ásperas e com um acabamento grosseiro. Contrastando ao exposto nesses dois casos, na Fig. 2.43c, a imagem microscópica da peça retificada eletroquimicamente apresenta uma superfície de melhor integridade estrutural, livre de produtos eletroquímicos oriundos das reações e com a presença de pequenas marcas que evidenciam a remoção por ação mecânica das partículas que estavam aderidas à base metálica.

Também relacionado à fabricação de microfuros, Tak e Mote (2021) compararam, durante a microusinagem eletroquímica em superfícies da liga de titânio Ti-6Al-4V, a utilização de uma ferramenta cilíndrica lisa em contrapartida à uma com abrasivos de diamante incrustados (ensaio híbrido), adotando-se uma solução eletrólítica de NaNO_3 com concentração 10 %. Os valores de tensão elétrica utilizados (10 V, 12 V e 14 V) consideraram um estudo prévio a respeito do caráter corrosivo do material. Na Figura 2.44 são mostradas as imagens obtidas em MEV na entrada e na parede lateral dos furos produzidos.

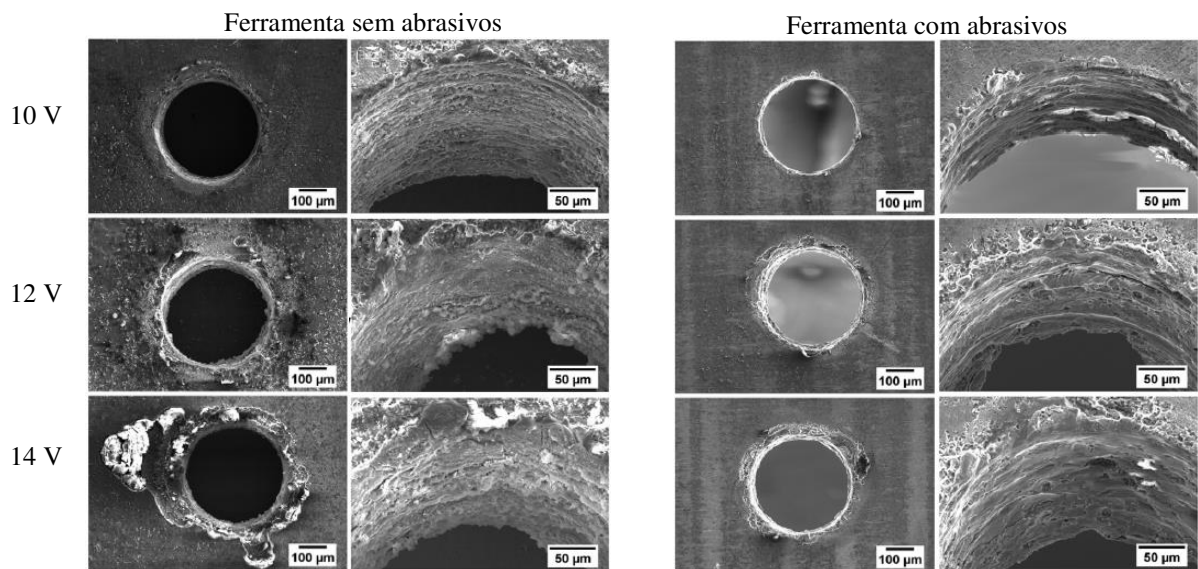


Figura 2.44 - Imagens, em MEV, na entrada e na parede lateral de microfuros produzidos por microusinagem eletroquímica com a utilização de dois tipos de ferramenta: uma lisa e outra abrasiva com partículas de diamante (TAK; MOTE, 2021).

Os autores concluíram que o uso de uma ferramenta abrasiva em etapa híbrida de fabricação beneficiou significativamente a qualidade da superfície usinada, uma vez que a atuação das partículas abrasivas promoveu a eliminação da camada passivada (macia e porosa) formada, além de contribuírem para circulação adequada de eletrólito na região de corte, favorecendo a ação eletroquímica do processo e a eficiência da usinagem.

2.5 Material da peça: Titânio e suas ligas

Considerado como um elemento de transição (segundo sua posição na tabela periódica) e alotrópico (mais de uma forma cristalográfica), o titânio é caracterizado por possuir altos pontos de fusão (próximo de 1 668 °C) e de ebulição (em torno de 3 287 °C) e baixa massa específica (4,54 g/cm³) (BRAGA *et al.*, 2007). À temperatura ambiente, apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta (HC ou α), estável até 882 °C, com limite de escoamento que abrange de 170 MPa a 480 MPa. Acima de 882 °C, a estrutura modifica-se para cúbica de corpo centrado (CCC ou β), apresentando maior resistência mecânica. A adição de elementos a uma base de titânio é influenciada pela capacidade em estabilizarem a fase α ou fase β (EZUGWU *et al.*, 2003).

A combinação entre a elevada resistência à corrosão do titânio, caracterizada pela formação espontânea de um filme de óxido protetor em sua superfície metálica quando exposto à atmosfera, às suas propriedades físicas e mecânicas mantidas em temperaturas relativamente mais altas que as tradicionais ligas Fe-C, o tornam uma vantajosa escolha para aplicações estruturais espaciais e nanoaeroespaciais (ASSIS e COSTA, 2007). Os autores Arrazola *et al.* (2009), Sadeghi *et al.* (2009) e Kadivar *et al.* (2018) também destacam a aplicabilidade das ligas de titânio nas áreas automotiva, química e médica, esta em função da biocompatibilidade de algumas ligas de titânio.

Contudo, a baixa condutividade térmica (21 W/mK frente a 50 W/mK do aço, 80 W/mK ligas ferro-carbono, 230 W/mK alumínio e 1 000 W/mK diamante), dificultando a dissipação de calor gerado durante o corte, somada à sua elevada afinidade química com a maioria dos materiais das ferramentas de corte, caracterizam o titânio e as suas ligas como materiais de difícil usinagem (BANERJEE *et al.*, 2016).

Marinescu *et al.* (2007) apresentam valores típicos para a retificabilidade (parâmetro que indica a usinabilidade de um material por meio da retificação) de diversos materiais, conforme exibido na Fig. 2.45, em que as ligas de titânio destacam-se por exibirem os valores mais baixos.

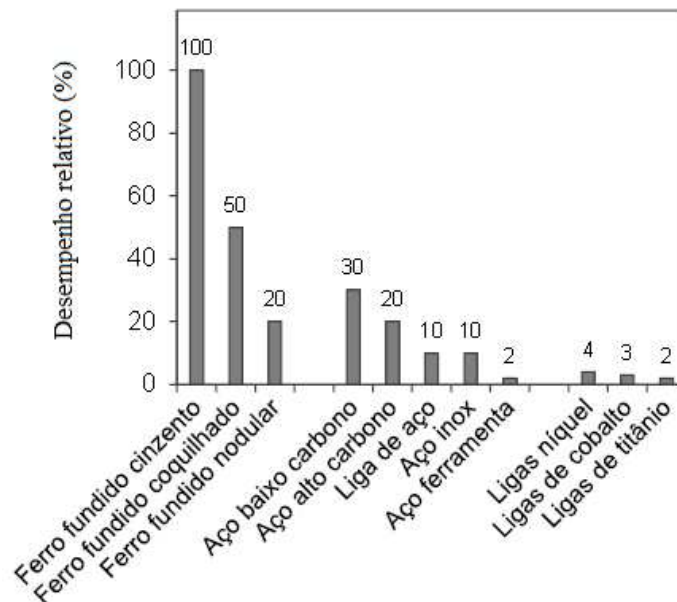
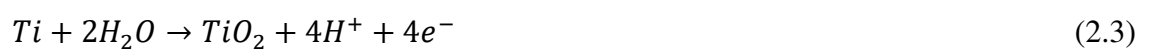


Figura 2.45 - Retificabilidade de ligas metálicas em % (adaptado de MARINESCU *et al.*, 2007).

Segundo Rahman *et al.* (2003), para se retificar peças a base de titânio, a ferramenta deve apresentar elevada dureza à quente para resistir à tensão envolvida, boa condutividade térmica de modo a minimizar choques térmicos, boa inércia química e alta resistência à tração, compressão e cisalhamento. Para tanto, destaca-se o desempenho na utilização de ferramentas com superabrasivos, principalmente diamante, em função da sua menor afinidade química.

Em relação ao seu comportamento eletroquímico, Davydov *et al.* (2017) reforçam a tendência natural à passivação do material quando exposto ao ar atmosférico, formando um filme protetor isolante elétrico, de menor resistência mecânica, composto principalmente de dióxido de titânio (TiO_2). Em meios eletrolíticos, também ressaltam a formação do óxido, formado pela reação global apresentada na Eq. (2.3).



De acordo com Klocke *et al.* (2014), para a usinagem eletroquímica de ligas à base de titânio, devem ser utilizados fluidos eletrolíticos capazes de ultrapassarem a passividade

natural, em que eletrólitos de caráter não-passivador devem ser adotados, como a solução aquosa de sal NaCl. Preferencialmente os eletrólitos devem ser aquecidos entre 30 °C a 50 °C em função nestas temperaturas proporcionar uma redução no potencial de ativação do titânio e suas ligas, promovendo a obtenção de melhores acabamentos superficiais. Quanto maior o valor desse potencial, maior a probabilidade em se desenvolverem defeitos como poros e fraturas, além de pites mais profundos, danificando a estrutura da peça (DAVYDOV *et al.*, 2017).

A avaliação e entendimento do comportamento desse filme de óxidos produzido superficialmente, e particularidades como a sua dimensão, são informações relevantes quando objetiva-se usinar peças em titânio. Nas Figuras 2.46a e 2.46b são ilustrados exemplos de imagens em amostras de Ti comercialmente puro via microscopia eletrônica em corte transversal, segundo as pesquisas de Dhobe *et al.* (2011) e Li *et al.* (2004), respectivamente, nas quais é possível quantificar a espessura da camada de óxidos.

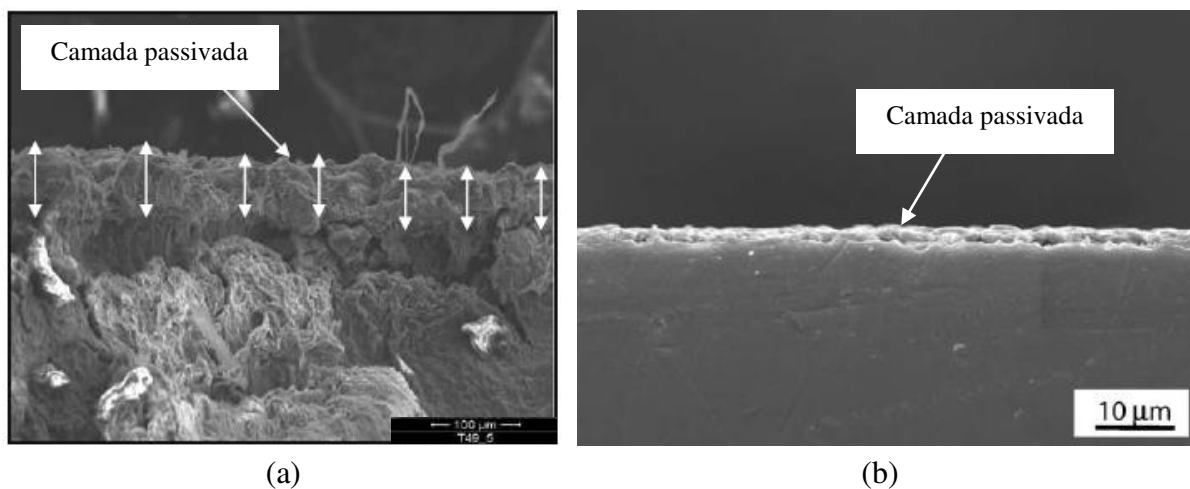


Figura 2.46 - Imagens em corte transversal, via MEV, indicando a camada de óxidos formada em peças de titânio, segundo estudos de (a) Dhobe *et al.* (2011) e (b) Li *et al.* (2004).

Dhobe *et al.* (2011) ainda destacam que o filme de óxidos formado sob a superfície usinada apresenta porosidade, com espessura uniforme praticamente constante, característica vantajosa para o estudo da corrosão e resistência química em implantes.

2.5.1 Liga Ti-6Al-4V

Relativamente à alotropia do titânio, os materiais responsáveis em aumentar a temperatura de transformação estrutural são denominados estabilizadores α , em que se encontram o Al, O, Sn, N e C, ao passo que os materiais responsáveis por reduzir essa

temperatura são denominados estabilizadores β , compostos pelo Cr, H, Ta, Nb, Mo e V. Tais elementos podem ser introduzidos em diferentes concentrações, produzindo diferentes ligas com base na composição e temperatura, as quais podem ser classificadas em ligas α , ligas próximas à α , ligas próximas a β , ligas β e ligas α - β (POLMEAR *et al.*, 2017).

As ligas α - β são caracterizadas por uma microestrutura que tende a equilibrar a presença tanto de estabilizadores α quanto estabilizadores β , garantindo propriedades mecânicas capazes de balancear as características de resistência mecânica e tenacidade em um mesmo material (BOYER, 1996). Dentro dessa classificação, e contando com mais de 50 % da produção de todas as ligas de titânio, se encontra o Ti-6Al-4V (ARRAZOLA *et al.*, 2009).

Apresentando como propriedades elevadas resistências à corrosão e à fadiga, resistência mecânica à tração igual a 895 MPa, limite de escoamento próximo a 828 MPa, dureza na ordem de 36 HRC (aproximadamente 354 HV) e módulo de elasticidade igual a 113,8 GPa (ASM HANDBOOK - Vol. 2, 1990), a liga Ti-6Al-4V se tornou conhecida como um material espacial, encontrando ampla aplicação na fabricação de pás para turbinas, no bocal e no anel do pistão e na câmara de combustão de turbinas a gás, além da sua utilização também em próteses dentárias e implantes cirúrgicos ortopédicos na área médica (SETTI *et al.*, 2015).

A norma ASTM B265 (2015) estabelece a faixa de concentração de Al, V e outros elementos que podem ser encontrados para a liga Ti-6Al-4V, conforme mostrado na Tab. 2.5, em que a porcentagem de titânio é determinada pela diferença percentual. Uma imagem em MEV da microestrutura da liga recozida, em que os grãos cinzas claro equiaxiais designam a fase α e a fase intergranular escura representa β , é apresentada na Fig. 2.47.

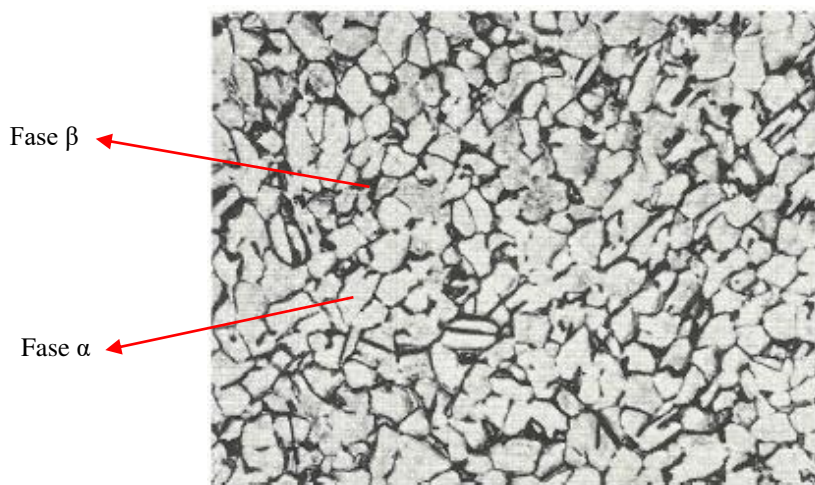


Figura 2.47 - Microestrutura da liga Ti-6Al-4V recozida (ampliação 280x) (THORTON; COLANGELO, 1985).

Tabela 2.5 - Composição química da liga Ti-6Al-4V (ASTM B265, 2015).

Elemento	C (Max)	Fe (Max)	N (Max)	O (Max)	Al	Si (Max)	V	H (Max)	Ti
Composição (% em peso)	0,08	0,40	0,05	0,20	5,50 a 6,80	0,15	3,50 a 4,50	0,015	Balanço

Pesquisas envolvendo a microrretificação e a usinagem eletroquímica, bem como o hibridismo entre esses processos, em peças da liga Ti-6Al-4V podem ser encontradas na literatura. Kadivar *et al.* (2018), por exemplo, avaliaram a influência da velocidade de corte na rugosidade superficial durante a microrretificação em peças dessa liga, utilizando-se de uma ferramenta de diâmetro igual a 2 mm e abrasivos de diamante granulometria 400 *mesh*. Foram avaliadas três diferentes situações, variando-se os valores de V_s em 6 m/s, 10 m/s e 14 m/s, e mantidos os demais parâmetros constantes. Os resultados encontrados para os parâmetros R_z (altura máxima do perfil) e R_a podem ser visualizados na Fig. 2.48.

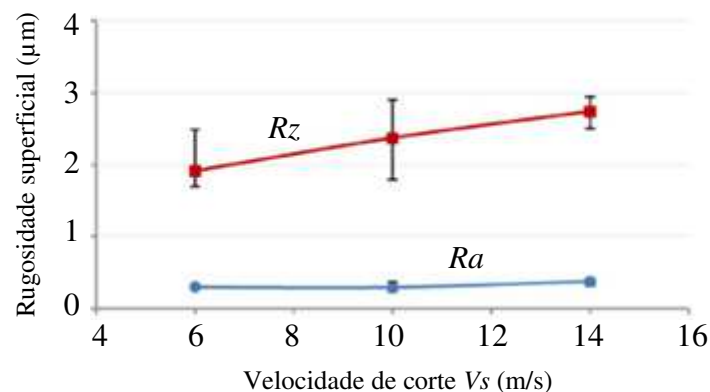


Figura 2.48 - Relação entre os parâmetros de rugosidade R_a e R_z com a velocidade de corte V_s na microrretificação de Ti-6Al-4V (adaptado de KADIVAR *et al.*, 2018).

Segundo os autores, diferentemente do observado para a retificação em macroescala, na microrretificação a rugosidade superficial aumenta com o aumento da velocidade de corte, R_z em maior grau e R_a em menor grau. Tal fato pode estar relacionado à ocorrência de vibrações detectadas durante a retificação em maiores velocidades de rotação, deteriorando a qualidade da superfície da peça. A relação inversa apresentada entre V_s e as forças de retificação indicaram que as forças normal e tangencial diminuem à medida em que se eleva a rotação da ferramenta, em função de uma possível redução na espessura média de cavaco não deformado.

He *et al.* (2018) investigaram a usinagem eletroquímica em peças de Ti-6Al-4V por meio de um eletrodo estacionário conectado ao pólo negativo de uma fonte de tensão elétrica pulsada

de 18 V e um eletrólito com concentração 10 % NaCl, mantido a 40 °C, com bombeamento direcionado à região do *gap*, inicialmente estimado a 0,6 mm. Para a faixa de valores adotada (0,4 mm/min a 1,8 mm/min), maiores velocidades resultaram em menores rugosidades, conforme apresentado na Fig. 2.49. Os autores ressaltaram a necessidade em se manter um equilíbrio entre a velocidade de avanço e a dissociação anódica do material metálico para a obtenção de melhores resultados de acabamento superficial, o qual é influenciado pela composição do fluido eletrolítico selecionado. Concluíram que a utilização do NaCl para a usinagem eletroquímica em peças de titânio e suas ligas pode ser vantajosa devido à capacidade dos íons cloreto (Cl^-) em solução em penetrar nos poros da camada isolante formada sob a superfície da peça, expondo a base metálica a novas etapas de dissociação anódica.

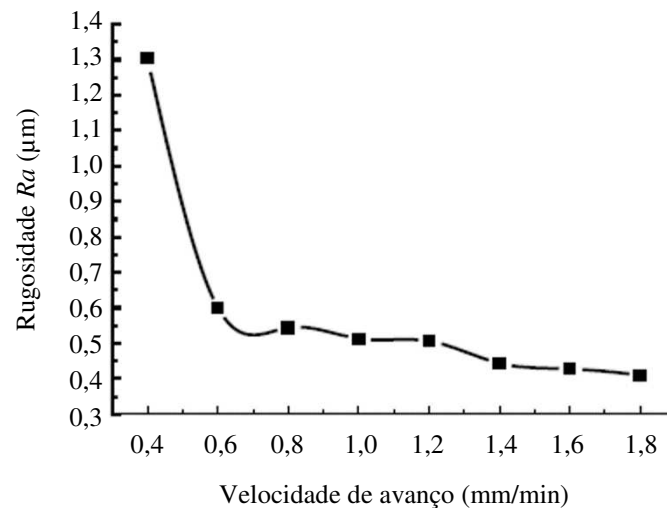


Figura 2.49 - Influência da velocidade de avanço na rugosidade superficial durante a usinagem eletroquímica em peças de Ti-6Al-4V (adaptado de HE *et al.*, 2018).

Em relação à retificação eletroquímica e micro-ECG, além dos trabalhos abordados nas seções 2.4.2 e 2.4.4, Lupak e Zaborski (2009) compararam o consumo energético, via simulação numérica, entre a retificação puramente abrasiva e a retificação eletroquímica em materiais de difícil usinagem, entre eles a liga Ti-6Al-4V. Como resultado, para o material em questão, tal consumo durante o processo abrasivo foi cerca de 70 % maior quando comparado à ECG, ressaltando as vantagens relacionadas à redução no desgaste da ferramenta e nos esforços mecânicos ao se considerar o processo híbrido.

Todavia, estudos envolvendo a avaliação da influência, em termos de acabamento superficial, da pré-produção de uma camada de passivação para a posterior usinagem mecânica por microrretificação em superfícies da liga Ti-6Al-4V ainda não são encontrados na literatura.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais desenvolvidos para alcançar o objetivo proposto da pesquisa, qual seja o de investigar a possibilidade em se produzir peças com acabamentos nanométricos ($Ra < 100$ nm) por meio de um processo híbrido envolvendo passivação metálica (ensaio eletroquímico) e conseguinte microrretificação (ensaio mecânico) da superfície passivada da liga Ti-6Al-4V. Os tópicos subsequentes abordam quanto à caracterização e preparação das peças, ferramentas utilizadas e a seleção dos parâmetros de corte definitivos, adaptação da minimáquina para os ensaios, avaliação do comportamento eletroquímico da liga, ensaios eletroquímicos de passivação do material, usinagem híbrida assistida e os equipamentos de caracterização empregados para as análises quantitativas e qualitativas dos resultados encontrados. Na Figura 3.1 é apresentado um fluxograma resumido das etapas compreendidas neste capítulo.

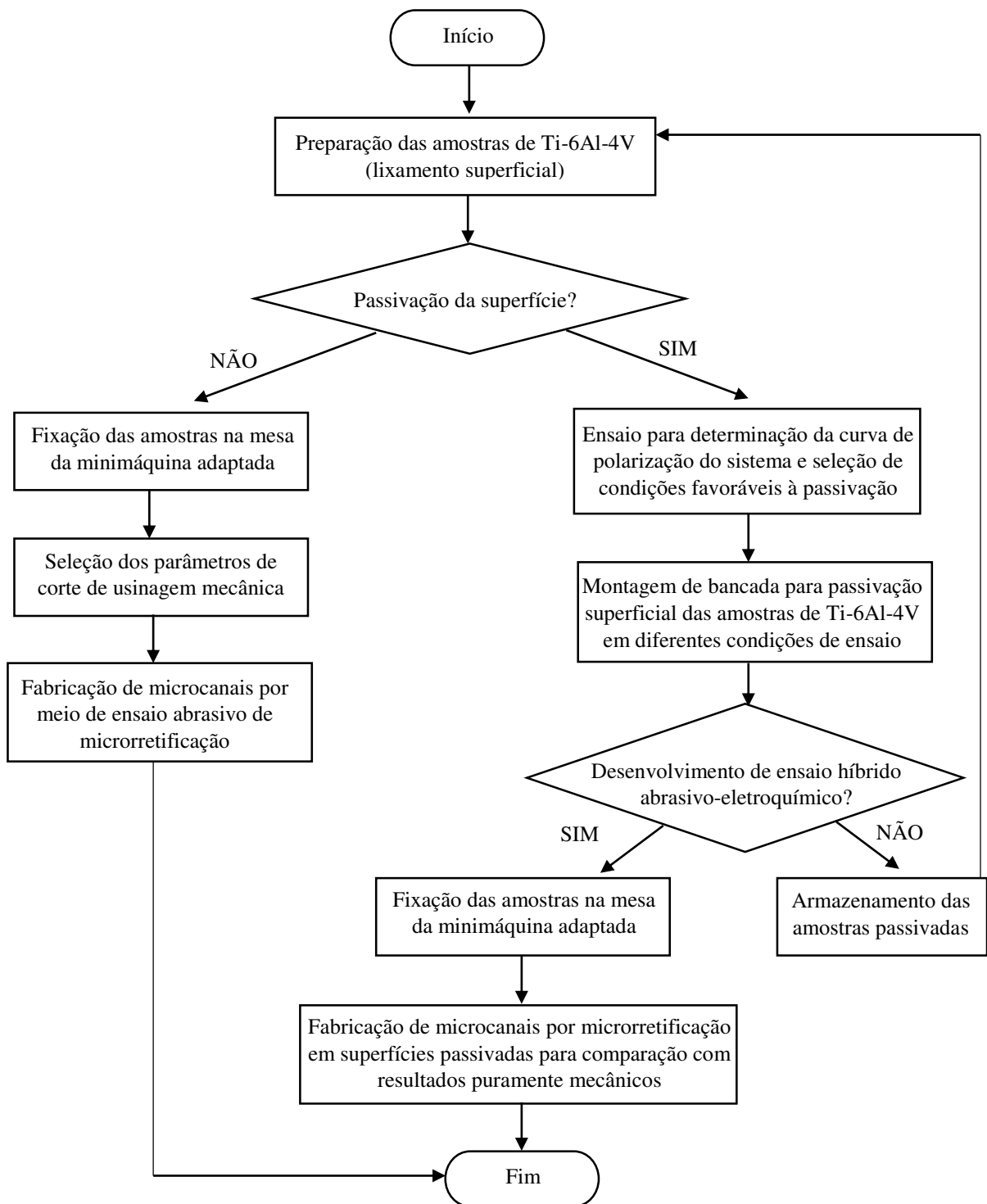


Figura 3.1 – Fluxograma resumido abordando as principais etapas relacionadas aos procedimentos experimentais desenvolvidos durante a pesquisa.

3.1 Obtenção e preparação dos corpos de prova

A liga Ti-6Al-4V foi doada pelo Laboratório de Tecnologia da Usinagem (LATUS) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) na UNESP, conforme ensaios de Cruz (2010), o qual foi seccionado por meio de um disco de corte em pequenas amostras (chapas), dimensionadas em 25 mm x 13 mm x 2 mm, aproximadamente. Para caracterização dessas peças, foi realizada a análise elementar por meio de um detector por microanálise EDS modelo INCA-X-ACT *Standart*, localizado no Laboratório de Multiusuários do Instituto de Química (LAMIQ) do Instituto de Química (IQ) na UFU, em que as composições químicas médias após 5 leituras (em porcentagem-peso) dos principais constituintes da liga são exibidas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química dos principais constituintes da liga Ti-6Al-4V avaliada.

Elemento	Al	V	Ti
Composição (% em peso)	6,41	3,67	89,92

Também foi realizada uma análise metalográfica do material cedido, esta por sua vez no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) na UFU. Para tanto, foram efetuadas as seguintes etapas de preparação: lixamento da superfície a ser atacada com sequência de papéis de lixa de granulometria 180 *mesh*, 240 *mesh*, 320 *mesh*, 400 *mesh*, 600 *mesh* e 1 200 *mesh*; em seguida polimento superficial em uma Politriz modelo PLF, utilizando-se de óxido de alumínio (alumina) com granulometria 0,1 μm . A superfície preparada foi então atacada por 10 s com o reagente denominado Kroll, contendo 1 % de ácido fluorídrico e 5 % de ácido nítrico, diluídos em 94 % de água destilada. Após o ataque químico, a peça foi lavada em água corrente, álcool isopropílico e seca com auxílio de soprador térmico. A microestrutura do material foi adquirida por meio da utilização de microscópio óptico e o *software Image Pro-Plus*.

De modo a estabelecer uma condição inicial homogênea a todas as amostras, possibilitando a posterior comparação entre os resultados obtidos, a ideia inicial consistiu na usinagem de todas as faces (superior, inferior e laterais) por meio do processo de retificação, em uma retificadora plana tangencial, de fabricante Mello, modelo P-36 e rotação máxima de 2 400 rpm do cabeçote. Durante a retificação foi utilizado um rebolo de SiC granulometria 60 *mesh* e adotados os seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte de 35 m/s, velocidade de avanço da mesa igual a 6 m/min e penetração de trabalho de 5 μm para cada passe, utilizando-se de um fluido de corte sintético de base vegetal, Grindex 10, concentração 5 % em

abundância com bocal direcionado para a interface peça-rebolo a fim de evitar danos térmicos. Ao final da retificação, as amostras apresentaram um valor médio de rugosidade Ra igual a $0,305 \mu\text{m} \pm 0,018 \mu\text{m}$, para uma confiabilidade de 95 %, porém com desvios de planeza medidos após a fixação da peça sob a mesa da minimáquina que ultrapassavam a faixa de $15 \mu\text{m}$ em uma área aproximada de 325mm^2 no eixo X e Y da superfície da peça.

Após a realização dos testes preliminares de microrretificação, mesmo após os ajustes de nivelamento da superfície, verificou-se que a preparação das amostras deveria ser aprimorada para evitar a necessidade de mais passes de usinagem para eliminação adequada do desvio de planeza na superfície das mesmas, aja vista a precisão necessária com base na escala micrométrica de trabalho e o planejamento experimental proposto. Optou-se, então, pela operação de lixamento superficial das peças, a qual inicialmente foi realizada no Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA) da FEMEC (UFU).

As dificuldades apresentadas quanto à base de referência para a etapa de lixamento no LAPROSOLDA, todavia, motivou a decisão em se preparar as amostras em um desempenho de granito (Fig. 3.2a). De fabricante Mitutoyo, com dimensões de $1\ 000 \text{mm}$ de comprimento e $1\ 000 \text{mm}$ de largura, o desempenho fica localizado no Laboratório de Metrologia Dimensional (LEMETRO) da FEMEC (UFU). O papel de lixa (granulometria 180 *mesh*) foi fixado paralelamente à mesa por meio de fita adesiva, para que a planeza do desempenho, considerada próxima de $4 \mu\text{m}$, fosse refletida em cada peça durante a sua preparação.

Para a operação, foram inicialmente fabricados três suportes em aço ABNT 1045 (Fig. 3.2b), nos quais as amostras eram individualmente coladas sobre a base superior. O projeto de cada suporte incluiu um furo central para facilitar a remoção das amostras por meio da rotação de um parafuso modelo M4 x 0,7 mm rosqueado na base inferior. As dimensões dos suportes foram calculadas para que se encaixassem em um porta-peça (Fig. 3.2c) desenvolvido por Fiocchi (2014). Três conjuntos foram fixados simultaneamente com o objetivo de alcançar superfícies coplanares e paralelas ao plano de referência do desempenho, fornecendo uma condição ótima para a operação. A montagem do conjunto porta-peça / suporte de aço / peça Ti-6Al-4V é mostrada na Fig. 3.2d. As amostras foram coladas nos suportes com adesivo cianoacrilato e mantidas fixadas para a etapa seguinte de microrretificação. Ao final do lixamento, mediu-se a rugosidade das amostras preparadas (Fig. 3.2e), fornecendo um Ra médio igual a $0,298 \mu\text{m} \pm 0,010 \mu\text{m}$ (valor de referência), para uma confiabilidade de 95 %, e desvio de planeza semelhante ao da mesa de referência ($4 \mu\text{m}$), avaliado por meio de um relógio comparador fixo ao cabeçote da minimáquina (conforme apresentado no item seguinte).

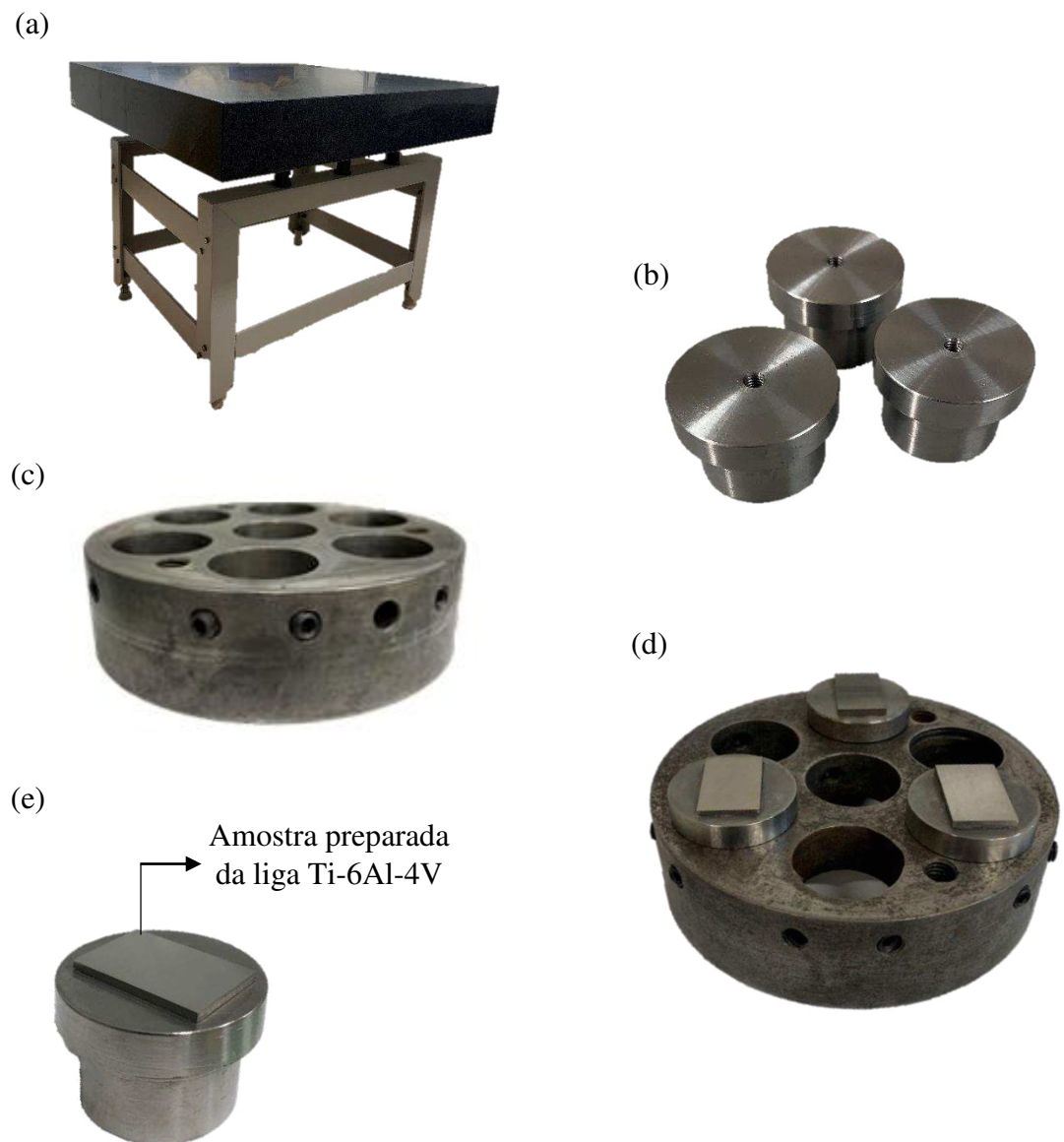


Figura 3.2 - Em (a) desempenho de granito, em (b) suporte de aço ABNT 1045, em (c) porta-peças, em (d) conjunto montado para etapa de lixamento e em (e) amostra de Ti-6Al-4V com superfície preparada.

3.2 Dispositivo de fixação das peças

Para a realização dos ensaios de microrretificação fez-se necessário o projeto e fabricação de um dispositivo mecânico de fixação das peças à mesa da minimáquina, ajustável quanto ao nivelamento e referenciamento da superfície a ser microrretificada. Para esta fase, foram desenvolvidas uma morsa e uma base metálica, ambas em alumínio puro comercial classe

AA1100, e uma bucha em Tecnil[®] para isolamento elétrico da peça (quando necessário) frente ao sistema mecânico montado. Nas Figuras 3.3a, 3.3b e 3.3c são mostradas as vistas em perspectiva isométrica desses dispositivos, respectivamente.

A base metálica se encaixava superiormente à morsa por meio de três parafusos Allen M6 x 1,0 mm de aço inoxidável e cabeça abaulada. A bucha em Tecnil[®] foi alocada no furo central da base, de modo que o conjunto final peça-suporte de aço, por sua vez, se encaixava no interior da bucha, sem folgas, garantindo a sua fixação.

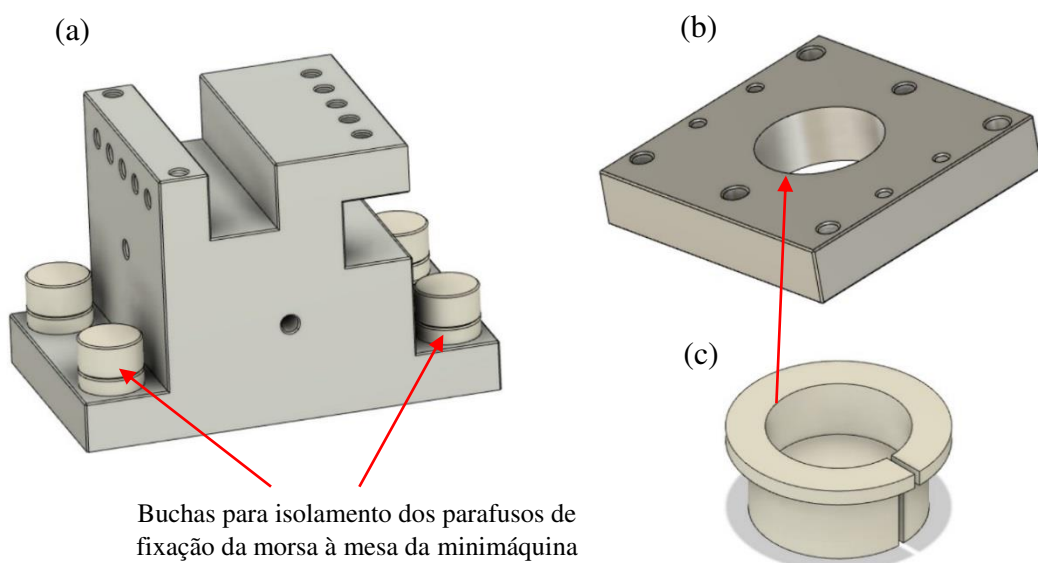


Figura 3.3 - Vistas em perspectiva isométrica da (a) morsa mecânica, (b) base metálica e (c) bucha de Tecnil[®] projetadas e fabricadas para os ensaios de usinagem.

Para cada um dos quatro parafusos de fixação da morsa à mesa da minimáquina também foram fabricadas buchas em Tecnil[®] tanto para envolverem o corpo do parafuso quanto para se encaixarem na cabeça do parafuso, afim de evitar conexão elétrica da morsa e volume de usinagem com o restante da minimáquina. Esse isolamento se fez necessário para que no caso do desenvolvimento de um processo simultâneo mecânico-eletriquímico, este ocorresse de forma controlada, sem interligar eletricamente a peça à máquina. Na Figura 3.4 é mostrada uma vista em corte da bucha de isolamento, da morsa e os demais componentes montados.

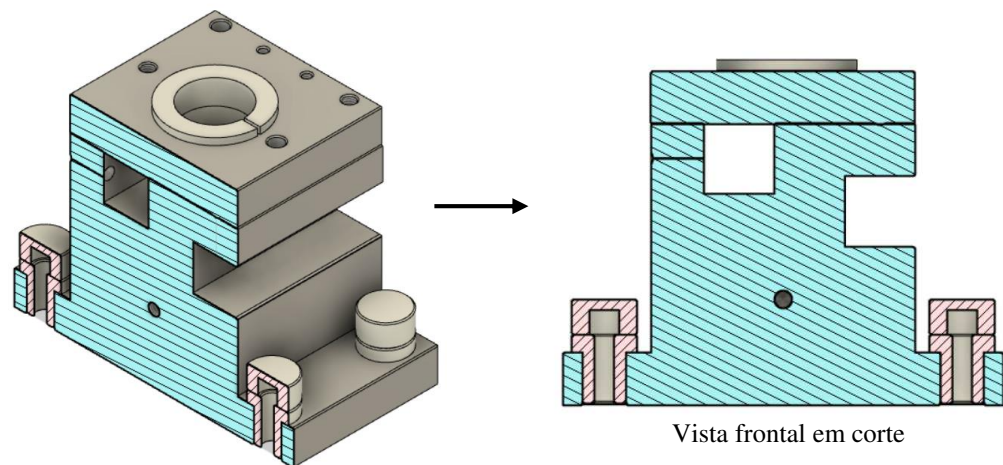


Figura 3.4 - Vista em corte dos elementos mecânicos da morsa com destaque para a região da bucha de fixação à mesa da minimáquina-ferramenta.

Apesar da preparação das peças sob a mesa de desempenho ainda foi necessária uma etapa de nivelamento da peça para alinhamento da superfície a ser microrrefritificada. Para efetuar esse nivelamento, além dos furos passantes para os parafusos de fixação, foram produzidos outros três furos roscados na base metálica de modo que o nivelamento fosse realizado por meio do ajuste desses parafusos (Allen M6 x 1,0 mm de aço inoxidável sem cabeça). As medições do foram realizadas por meio de um relógio comparador do fabricante Mitutoyo de resolução 1 μm , fixo à estrutura da máquina conforme apresentado na Fig. 3.5.

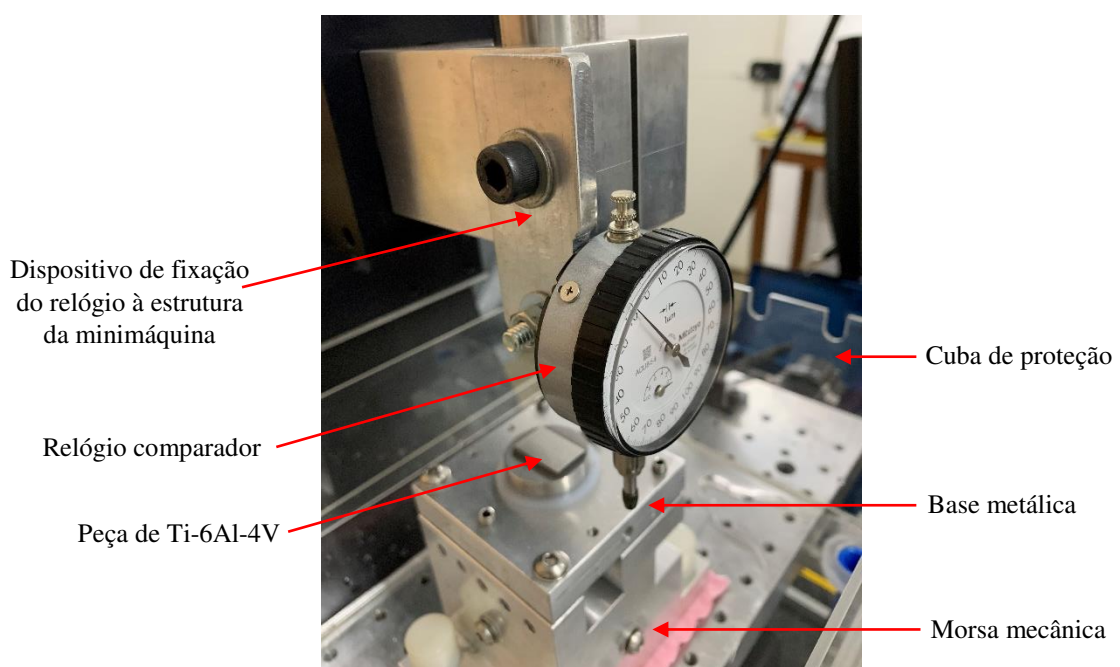


Figura 3.5 - Fixação do relógio comparador à estrutura da minimáquina.

Com o relógio pressionado a uma carga média de contato, apalpava-se a superfície da peça nos eixos X e Y pelo deslocamento da estrutura por comando numérico, e a leitura do nivelamento efetuada de forma direta no mostrador do relógio. Os ajustes manuais dos parafusos eram realizados até serem obtidas leituras próximas ao valor da resolução do instrumento de medição, garantindo o paralelismo da superfície da peça em relação à mesa da minimáquina (plano XY). Quatro furos passantes extras M4 x 0,7 mm foram fabricados na base para caso fosse necessária uma diferente abordagem de fixação das amostras sobre o aparato. Na Figura 3.6 é destacada a montagem completa do sistema mecânico.

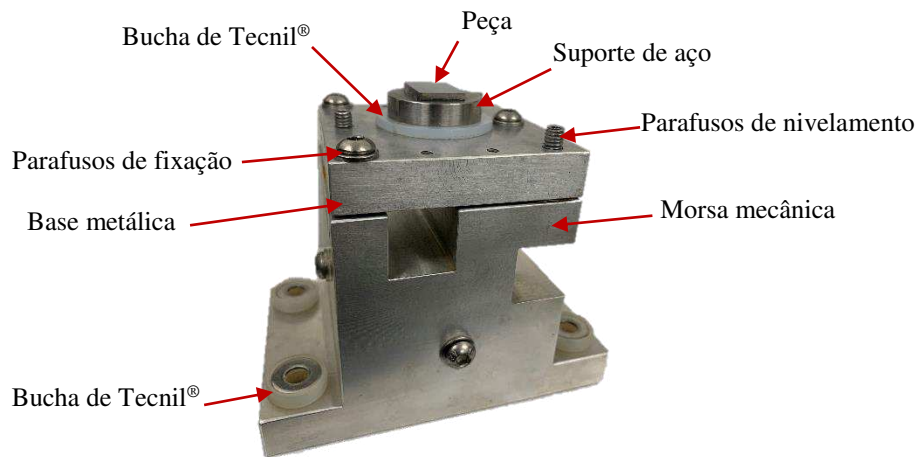


Figura 3.6 - Sistema para fixação e nivelamento das peças.

3.3 Microrrebolos

Para a realização dos ensaios de microrretificação, foram adquiridos microrrebolos ou pontas montadas diamantadas (abrasivos de diamante sintético monocristalinos) e eletrolíticas (ligante níquel) com diferentes geometrias de modo a identificar aquela que fornecesse melhores resultados frente às condições de corte selecionadas durante os ensaios mecânicos preliminares. Os ensaios visaram os menores valores de rugosidade, minimização de rebarbas, maior vida da ferramenta com ancoragem e protrusão dos abrasivos e não entupimento do rebolo. Para cada ponta adquirida, optou-se pela menor dimensão disponível das partículas abrasivas nos fornecedores nacionais, de acordo com a limitação de produção da empresa fabricante ou importador.

Na Figura 3.7 são mostrados os modelos adquiridos nas empresas Master Diamond - Ferramentas Diamantadas (1 e 3) e Rediam Ferramentas Diamantadas (2), localizadas em São Paulo - SP, com diâmetros de ponta iguais a 0,95 mm, 0,80 mm e 0,85 mm, em ordem cronológica de aquisição. Os três modelos apresentam haste metálica de diâmetro 3,00 mm, sendo essas as ferramentas de menores diâmetros disponíveis no mercado nacional que atenderam as exigências desta pesquisa.

Ressalta-se que em função da utilização de profundidades de corte na faixa micrométrica de trabalho, os ensaios de usinagem se concentraram majoritariamente na região de topo da ferramenta, ocasionando um regime misto de microrretificação frontal e tangencial.

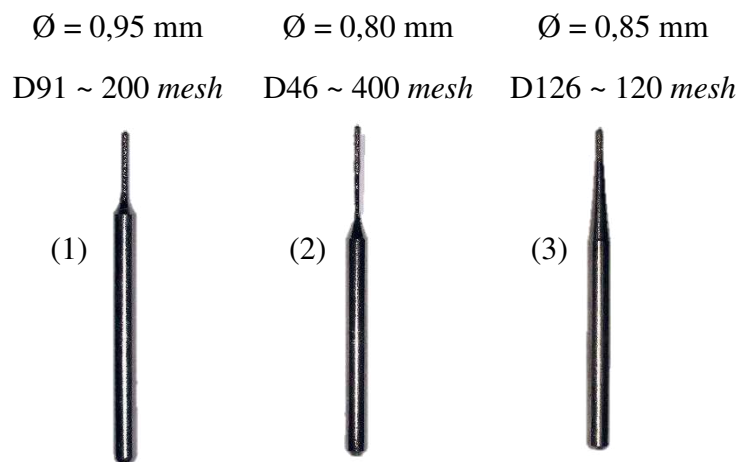


Figura 3.7 - Microrrebolos ou pontas montadas eletrolíticas com ligante de níquel e com abrasivos sintéticos de diamante.

Foram realizados testes mecânicos preliminares variando-se os parâmetros de corte para familiarização e avaliação do processo de microrretificação bem como da integridade dos modelos de ponta adquiridos, buscando determinar as melhores condições de usinagem que fornecessem os menores valores de rugosidade Ra . Quanto à V_s (associada à rotação programada na minimáquina), foram adotados valores de 0,70 m/s (n aproximado respectivo a 15 000 rpm), 1,35 m/s (n 30 000 rpm), 2,00 m/s (n 45 000 rpm) e 2,65 m/s (n 60 000 rpm). Para a_p , os valores variaram entre 1 μm e 25 μm e para V_w foram considerados velocidades de avanço de 2,5 mm/min (faixa menor) a de 90 mm/min (faixa maior).

Após as análises, verificou-se que o microrrebolo de melhor desempenho foi o terceiro (Fig. 3.7), apresentando maior rigidez dinâmica (geometria de haste cônica), maior vida e

melhor acabamento resultante nas peças, sendo este o selecionado para o desenvolvimento dos ensaios definitivos.

3.4 Adaptação da minimáquina e a condução dos ensaios mecânicos

Os testes mecânicos de microrretificação foram realizados em uma minimáquina-ferramenta modelo CNC Mini-mill/GX, de fabricante Minitech Machinery Corporation®, com 3 eixos lineares cartesianos e cabeçote Nakanishi modelo EM-3060 de rotação máxima do eixo árvore de 60 000 rpm. A minimáquina, alocada no Laboratório de Microusinagem da FEMEC (UFU), possui, segundo o fabricante, exatidão de posicionamento de 0,1 μm , faixas nominais de 300 mm, 228 mm e 228 mm para os eixos X, Y e Z, respectivamente, e velocidade de avanço máxima de 1 000 mm/min.

Características importantes do equipamento que o qualificam para processos de microusinagem são a estrutura de granito natural, guias lineares e fusos de elementos recirculantes e acionamento dos motores (servomotores) dos três eixos lineares operando em malha fechada com as controladoras. A máquina se encontra apoiada sob uma mesa inercial de granito sintético, suspensa por quatro molas helicoidais, especialmente projetada para diminuir a influência de vibrações de fontes externas nos processos de usinagem. O comando numérico é efetuado por meio do *software Mach3Mill*.

O microrrebolo foi acoplado ao cabeçote por meio de uma pinça modelo CHK3, a qual foi encaixada no suporte modelo F0-R5 da minimáquina, de modo que o seu referenciamento na direção Z sob a superfície da peça foi realizado antes de cada ensaio considerando cada uma das posições X e Y estimadas dos canais a serem fabricados. Para tal operação, um ciclo automatizado de movimentação da ferramenta foi desenvolvido. O programa CNC, desenvolvido em Código G, é apresentado no APÊNDICE I. Com a ferramenta acionada, ajustou-se o deslocamento da ferramenta na direção Z ao encontro da peça 1 μm por passe até que fosse efetuada uma marcação visível na mesma direção em que o canal seria produzido indicando o contato entre ambos. Tal posição foi utilizada como referência para se definir os valores de profundidade de corte selecionados.

Considerando a vazão do fluido de corte, dimensões da amostra e da morsa, assim como a função de proteger o restante da máquina da atmosfera de usinagem sem comprometer a movimentação da ferramenta e instrumento de medição para nivelamento dos corpos de prova,

foi projetado uma cuba, conforme apresentado na Fig. 3.8a, fabricada em acrílico seguindo as dimensões de 250 mm x 200 mm x 120 mm, no interior da qual os ensaios foram realizados. Foram produzidos quatro furos centrais na base inferior da cuba considerando os furos de encaixe na mesa da minimáquina, além de um dreno no canto frontal direito para encaixe de um conector hidráulico responsável pela descarga do fluido. Ainda, foram projetadas janelas frontal e traseira ajustáveis, permitindo o ajuste da altura das paredes sem comprometer o curso do eixo Z, maximizando a contenção da região de corte.

Projetou-se também um reservatório de fluido dividido em dois compartimentos de acordo com a Fig. 3.8b, fabricado também em acrílico nas dimensões de 250 mm x 140 mm x 150 mm, com funções de armazenamento, filtragem, controle de temperatura e alojamento de uma bomba submersa para bombeamento do fluido.

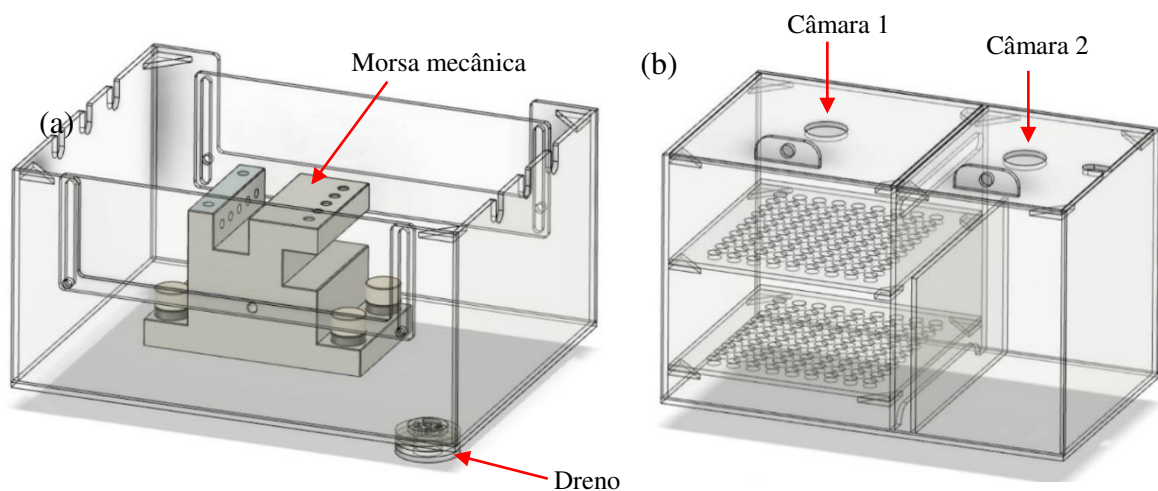


Figura 3.8 - Projeto em perspectiva isométrica (a) da cuba eletrolítica e (b) do reservatório de eletrólito/fluido de corte utilizados para os ensaios abrasivos e eletroquímicos de usinagem.

A morsa foi então alocada sob a cuba, esta por sua vez posicionada em cima da mesa da minimáquina, fixadas por meio de parafusos Allen de $\frac{1}{4}$ " de aço inoxidável AISI 304 e cabeça cilíndrica. Na primeira câmara do reservatório ocorreu a chegada do fluido por meio de uma mangueira de silicone encaixada na saída do conector hidráulico na cuba, de modo que o fluido transpassa por duas camadas de filtros responsáveis pela retenção mecânica dos resíduos dos processos de remoção. Uma chicana vertical assegurava a circulação do fluido limpo e regulava os níveis do fluido nas duas câmaras. No segundo compartimento, foi localizada uma bomba submersa Sarlo Better modelo SB2000 de potência de 30 W. A vazão de fluido foi regulada na saída da bomba por meio de duas válvulas. Uma regulou o fluxo direcionado à cuba e a outra o

retorno de fluido para a câmara 2, uma vez que a bomba operou com vazão constante. A recirculação objetivou não sobrecarregar a bomba.

Nas Figuras 3.9a e 3.9b são exibidas a representação esquemática e a situação real da montagem da cuba sob a mesa da minimáquina para a realização dos ensaios de usinagem, respectivamente. Uma junta de vedação foi utilizada entre a base da morsa e o contato com a cuba de proteção para evitar escoamento do fluido para a mesa da minimáquina.

Durante os ensaios mecânicos, pretendia-se a utilização de fluido de corte de igual composição e condições da solução dos ensaios eletroquímicos (água destilada + NaCl à temperatura controlada), de modo a não criar uma nova variável de influência para comparação entre os resultados dos processos. Optando pela proteção à estrutura metálica da minimáquina e ao ambiente de trabalho do laboratório, selecionou-se água destilada à 30 °C (sem a adição de NaCl) como fluido de corte, a qual atuou para manter a temperatura de corte uniforme durante a microrretificação, auxiliando na remoção de cavacos e obtenção de superfícies livres de queimas e danos térmicos.

A bomba mantinha a movimentação do fluido a uma vazão constante aproximada de 30 L/h, em que um bocal de diâmetro 5 mm foi posicionado próximo à ferramenta de corte com jato direcionado à ponta do microrrebolo. O posicionamento do bocal é representado na Fig. 3.9b. O controle de temperatura do fluido foi realizado por meio de um termostato de fabricante Hobar modelo H-606 mantido no reservatório de fluido.

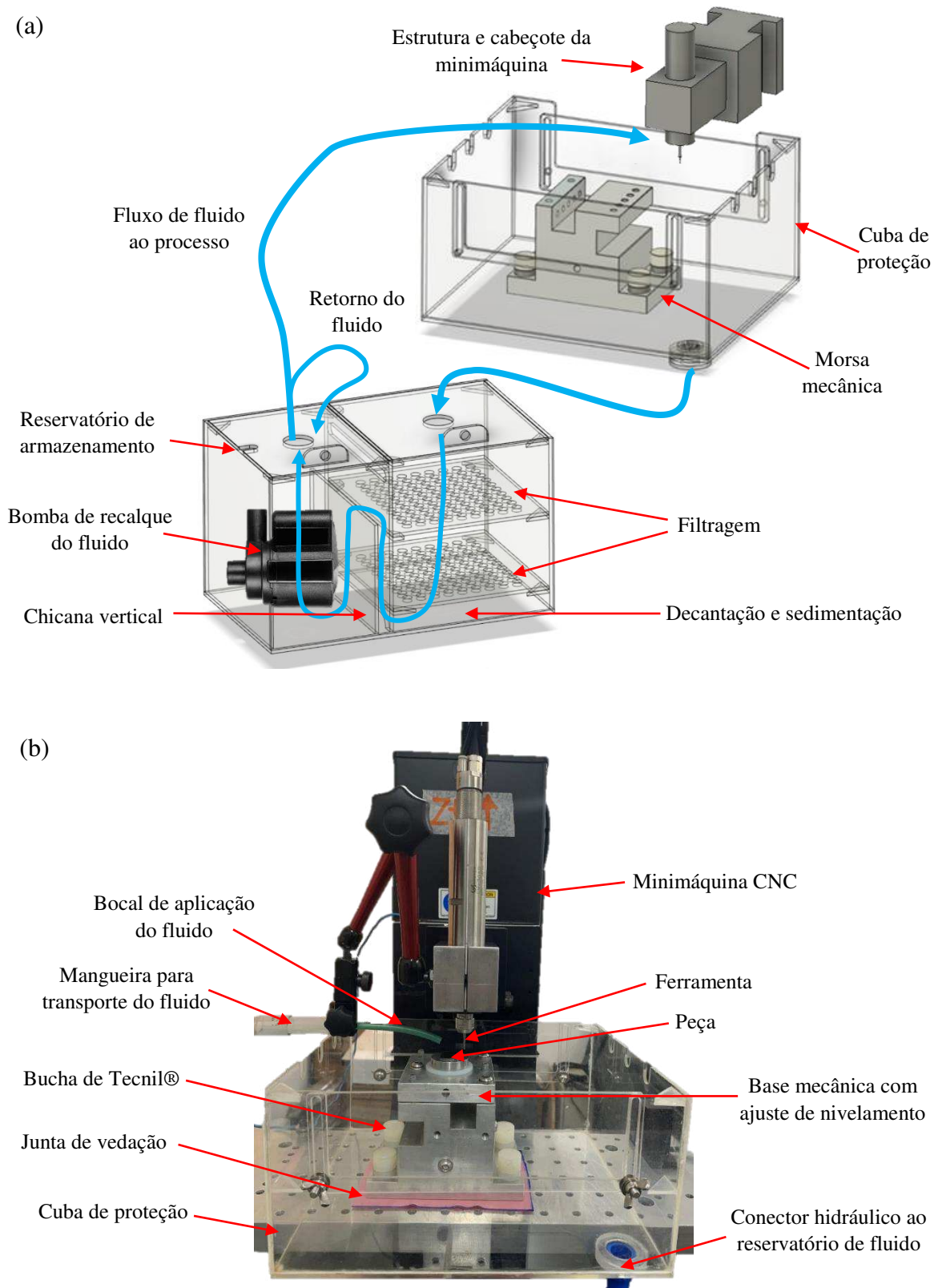


Figura 3.9 - Em (a) esquema representativo do sistema projetado para bombeamento e filtragem de fluido de corte (água destilada) e em (b) imagem real do sistema montado sob a mesa da minimáquina.

3.4.1 Parâmetros de microrretificação

Neste item, abordou-se a seleção dos valores para compor um planejamento experimental 3 x 3 x 3 para os ensaios de microrretificação em termos de velocidade de corte (V_s), profundidade de corte (a_p) e velocidade de avanço (V_w), visando determinar as condições de corte que fornecessem os menores valores quanto ao parâmetro de rugosidade Ra , enquadrando-se em um processo de ultraprecisão ($Ra < 100$ nm).

- Velocidade de corte (V_s)

O cálculo da velocidade do rebolo (V_s), em m/s, pode ser realizado pela Eq. 3.1:

$$V_s = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} \quad (3.1)$$

em que: D corresponde ao diâmetro do microrrebolo, em mm, n à sua rotação em rpm e 60 000 a correção para ajuste das unidades.

Seguindo as recomendações dos fabricantes das pontas diamantadas aliadas aos resultados de ensaios preliminares baseados na pesquisa de Gong *et al.* (2014) frente à avaliação superficial de amostras da liga Ti-6Al-4V microrretificadas, as diferentes condições para avaliação da influência da rotação com base no limite do cabeçote instalado na minimáquina, foram iguais a: (1) 30 000 rpm, (2) 45 000 rpm e (3) 60 000 rpm. Assim, considerando o diâmetro médio das pontas D igual a 0,85 mm, e substituindo os três valores de rotação adotados na Eq. (3.1), foram obtidos os três respectivos valores de velocidade de corte, a seguir:

$$n_1 = 30\,000 \text{ rpm} \rightarrow V_{s1} = 1,35 \text{ m/s}$$

$$n_2 = 45\,000 \text{ rpm} \rightarrow V_{s2} = 2,00 \text{ m/s}$$

$$n_3 = 60\,000 \text{ rpm} \rightarrow V_{s3} = 2,65 \text{ m/s}$$

- Profundidade de corte (a_p)

Buscando compensar influências dos desvios macrogeométricos após o procedimento de nivelamento da peça (desvios de planeza próximos à resolução do instrumento metrológico de medição de 1 μm) e garantir a formação de um microcanal bem definido ao longo do

comprimento de usinagem, respaldando-se ainda pelos valores considerados por Aurich *et al.* (2009), Jin e Cheng (2017) e Cheng *et al.* (2018) e da resolução de posicionamento da minimáquina, selecionou-se um valor mínimo de ap igual a $5 \mu\text{m}$ (passe único).

De modo a investigar o comportamento na qualidade da superfície produzida nos ensaios ao se introduzir maior contato entre ferramenta e peça aliado a maior quantidade de material removido por passe, considerou-se a adoção dos valores múltiplos de ap para compor esse planejamento, conforme apresentado a seguir:

$$ap_1 = 5 \mu\text{m}$$

$$ap_2 = 10 \mu\text{m}$$

$$ap_3 = 15 \mu\text{m}$$

- Velocidade de avanço da peça (V_w)

Para a determinação dos valores de V_w , foi realizada uma aproximação do modelo matemático utilizado na determinação da velocidade de avanço V_f no microfresamento apresentado na Eq. (3.2), em que f_z refere-se ao avanço por dente da microfresa [mm/dente], z ao número de dentes na microfresa e n à sua rpm.

$$V_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (3.2)$$

Nesse contexto, V_w foi definido conforme apresentado na Eq. (3.3), em que f_{z_a} corresponde ao avanço por aresta de corte ativa, z_a ao número de partículas abrasivas ativas que participam efetivamente na remoção de material durante a microrretificação e n à rotação do microrrebolo, acrescido de um fator de correção N_s , adimensional, correspondente à associação dos dentes de uma microfresa às arestas de corte dos abrasivos no microrrebolo.

$$V_w = N_s \cdot f_{z_a} \cdot z_a \cdot n \quad (3.3)$$

Tal ajuste corretivo se faz necessário para enquadrar o modelo ao processo de corte com ferramenta de geometria não definida considerando fatores tribológicos como desgaste e deflexão do rebolo, fratura das arestas de corte, porosidade, entupimento e vibrações mecânicas.

O valor de N_s , para este trabalho, foi adotado como sendo igual a 0,01, selecionado com base na análise numérica por elementos finitos de predição do acabamento da superfície gerada durante a microrretificação proposto por Feng *et al.* (2012). De acordo com o modelo, duas hipóteses são consideradas. A primeira pressupõe que todo o material em contato com a ferramenta de corte é removido. A segunda indica que uma usinagem mais estável (avaliada pela menor diferença entre os valores encontrados para os parâmetros de rugosidade Ra e Rq simulado e experimentalmente) ocorre quando da utilização de menores velocidades de avanço.

Os demais parâmetros foram selecionados da seguinte forma: segundo os autores Rezaei *et al.* (2018), no microfresamento da liga Ti-6Al-4V, a espessura mínima de cavaco não deformado (informação utilizada para determinar f_z) ocorre entre 25 % a 49 % do raio de aresta da microfresa na condição de usinagem a seco, e 15 % a 34 % na condição aplicando o método MQL. Adaptando-se esse princípio à condição de independência sobre a utilização de fluido de corte, assumiu-se, para a equivalência na microrretificação, que o valor de f_{z_a} pode ser determinado considerando que a espessura mínima de cavaco não deformado ocorra na faixa de 49 % do raio efetivo de corte do abrasivo.

De acordo com Lal e Shaw (1975), o raio efetivo de corte do abrasivo ρ independe das condições de retificação como presença ou não de fluido de corte e variação nos valores da velocidade de corte e de velocidade de avanço, estando diretamente relacionado à dimensão nominal do abrasivo, e pode ser definido de acordo com a Eq. (3.4), em que g representa o diâmetro nominal da partícula abrasiva, que no caso da ferramenta adotada (modelo 3), g equivale a 0,124 mm.

$$\rho = 0,054 \cdot g^{0,53} \quad (3.4)$$

Assim, f_{z_a} , cuja interpretação é apresentada em desenho esquemático na Fig. 3.10, pode ser determinado de acordo com o exposto na Eq. (3.5).

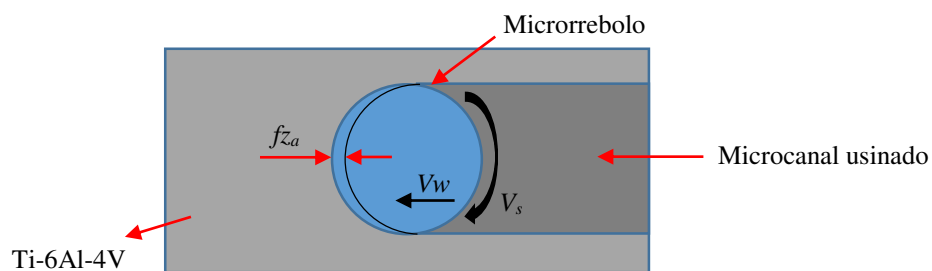


Figura 3.10 - Desenho esquemático da variável f_{z_a} .

$$\rho = 0,054 \cdot 0,124^{0,53} \rightarrow \rho \cong 0,017 \text{ mm} \quad (3.5)$$

$$fz_a = 49 \% \text{ de } \rho \rightarrow fz_a = 0,49 \cdot 0,017 \rightarrow fz_a = 0,008 \text{ mm}$$

Para a determinação de z_a , foram analisadas as imagens de topo e lateral da ferramenta de corte (modelo 3). Por meio da imagem lateral da ponta, foram realizadas 15 leituras dos valores de protrusão das partículas abrasivas, responsáveis pelo cisalhamento do material, via programa computacional ImageJ, em que foi obtido um resultado médio de 0,070 mm. Comparando o valor médio ao valor de protrusão individual de cada partícula abrasiva, relacionado ainda aos valores de profundidade de corte (ap) selecionados, definiu-se z_a igual a 13 como a quantidade de abrasivos que participam efetivamente da usinagem (os demais não foram contabilizados por apresentarem menores protrusões), conforme destacado na imagem, em MEV, da região de topo do microrrebolo, exibida na Fig. 3.11.

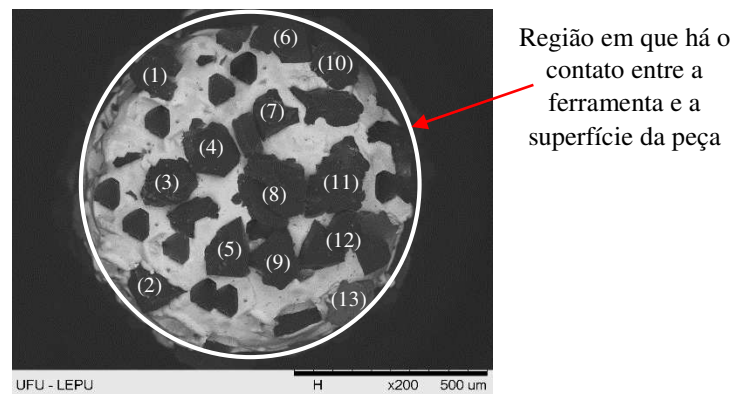


Figura 3.11 - Imagem, em MEV, da vista superior frontal do microrrebolo. O ligante de níquel é mostrado nas regiões claras enquanto as partículas abrasivas nas escuras.

Com base na rotação de 30 000 rpm, a partir da qual de acordo com os ensaios preliminares, a ação da ferramenta apresentou eficiência no corte de material, um valor para V_w foi calculado substituindo-se os valores na Eq. 3.3, conforme expresso na Eq. 3.6.

$$V_w = 0,01 \cdot 0,008 \cdot 13 \cdot 30\ 000 \cong 1 \cdot 10^{-3} \cdot 30\ 000 \quad (3.6)$$

$$V_w \cong 30 \text{ mm/min}$$

De modo a completar um planejamento experimental $3 \times 3 \times 3$ para avaliar a influência da variável V_w , considerou-se a multiplicidade do valor encontrado, em que se definiu:

$$Vw_1 = 30 \text{ mm/min}$$

$$Vw_2 = 60 \text{ mm/min}$$

$$Vw_3 = 90 \text{ mm/min}$$

3.4.2 Matriz de planejamento experimental para a microrretificação

Os ensaios de microrretificação foram definidos de acordo com a matriz de planejamento experimental 3 x 3 x 3 apresentada na Tab. 3.2, em que foram usinados microcanais sob as superfícies de peças da liga Ti-6Al-4V. Considerou-se a variação dos parâmetros de corte em três níveis cada, sendo eles: velocidade de corte V_s - 1,35 m/s (n igual a 30 000 rpm), 2,00 m/s (n 45 000 rpm) e 2,65 m/s (n 60 000 rpm); profundidade de corte ap - 5 μm , 10 μm e 15 μm ; e velocidade de avanço da peça V_w - 30 mm/min, 60 mm/min e 90 mm/min.

Tabela 3.2 - Matriz de planejamento fatorial completo 3 x 3 x 3 para a microrretificação.

Experimento	Fator 1 V_s [m/s]	Fator 2 ap [μm]	Fator 3 V_w [mm/min]
1	-1 (1,35)	-1 (5)	-1 (30)
2	-1 (1,35)	-1 (5)	0 (60)
3	-1 (1,35)	-1 (5)	1 (90)
4	-1 (1,35)	0 (10)	-1 (30)
5	-1 (1,35)	0 (10)	0 (60)
6	-1 (1,35)	0 (10)	1 (90)
7	-1 (1,35)	1 (15)	-1 (30)
8	-1 (1,35)	1 (15)	0 (60)
9	-1 (1,35)	1 (15)	1 (90)
10	0 (2,00)	-1 (5)	-1 (30)
11	0 (2,00)	-1 (5)	0 (60)
12	0 (2,00)	-1 (5)	1 (90)
13	0 (2,00)	0 (10)	-1 (30)
14	0 (2,00)	0 (10)	0 (60)
15	0 (2,00)	0 (10)	1 (90)
16	0 (2,00)	1 (15)	-1 (30)
17	0 (2,00)	1 (15)	0 (60)
18	0 (2,00)	1 (15)	1 (90)
19	1 (2,65)	-1 (5)	-1 (30)
20	1 (2,65)	-1 (5)	0 (60)
21	1 (2,65)	-1 (5)	1 (90)
22	1 (2,65)	0 (10)	-1 (30)
23	1 (2,65)	0 (10)	0 (60)
24	1 (2,65)	0 (10)	1 (90)
25	1 (2,65)	1 (15)	-1 (30)
26	1 (2,65)	1 (15)	0 (60)
27	1 (2,65)	1 (15)	1 (90)

Conforme apresentado na Tabela 3.2, foram realizados 27 ensaios. Para cada condição, foi efetuada uma réplica, totalizando 54 ensaios. Na Figura 3.12 é ilustrada esquematicamente a operação de microrretificação de três canais sob a superfície da peça que foi inicialmente lixada (preparação mecânica), em que são destacados a direção de avanço, o sentido de rotação da microferramenta e as dimensões de profundidade de corte (a_p) e penetração de trabalho (a_e). O comprimento de usinagem refere-se a aproximadamente metade do comprimento da peça (7 mm), selecionado com foco em reduzir o comprimento do canal para poupar ferramenta, reduzir o tempo da microrretificação, porém garantindo um comprimento útil para avaliação da rugosidade superficial.

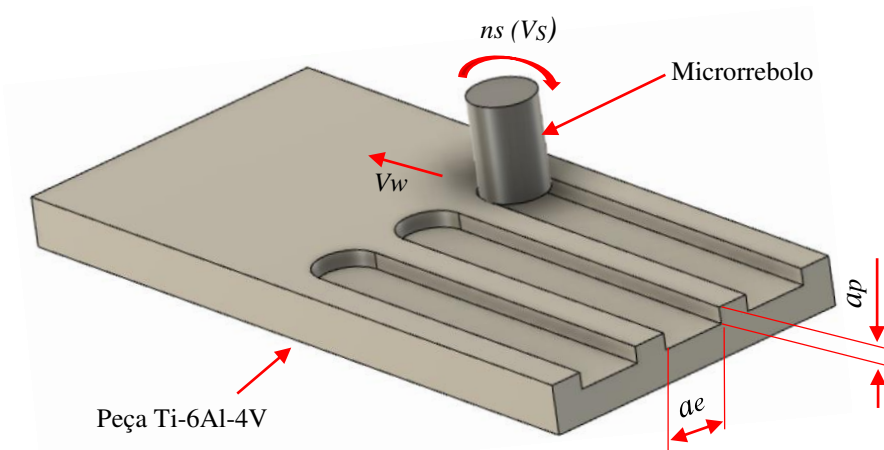


Figura 3.12 - Esquema da operação de usinagem de um microcanal por microrretificação.

Destaca-se que no desenvolvimento deste trabalho, além dos canais fabricados conforme representando na figura (a_p constante), foram também usinados canais ao longo de todo o comprimento das peças adotando-se uma condição de a_p variável, resultado de um desnivelamento do conjunto peça-suporte de aço. O detalhamento desta operação é apresentado no subitem 3.6.2.

3.5 Caracterização eletroquímica da liga Ti-6Al-4V

Neste tópico apresentam-se os procedimentos realizados quanto aos ensaios eletroquímicos de polarização do sistema eletrólito-metal (curva potenciodinâmica) e de determinação da espessura da camada de passivação.

3.5.1 Curva de polarização potenciodinâmica

No Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da FEMEC (UFU) ensaiou-se a curva de polarização do sistema eletrólito-metal, em que a estrutura do reservatório de eletrólito foi utilizada como o aparato no interior da qual as reações foram realizadas. A amostra da liga Ti-6Al-4V foi utilizada como ânodo e uma solução água destilada + sal (NaCl) com concentração 10 % a temperatura controlada de 30 °C e pH de 6,5 (considerado neutro) foi adotada como eletrólito. Além disso, considerou-se o fluxo da solução direcionado à região exposta do metal para que o ataque fosse concentrado na área desejada, por meio da utilização de uma mangueira polimérica, em que uma bomba submersa e um termostato foram empregados garantindo a movimentação do eletrólito para o transporte de corrente elétrica durante as reações e a manutenção da temperatura do fluido, respectivamente.

Com base nos ensaios prévios e metodologia desenvolvida por Ardila (2013), para a preparação da região a ser atacada foi realizado o procedimento de lixamento superficial da peça adotando-se sequencialmente as folhas de lixa 180 *mesh*, 280 *mesh*, 400 *mesh* e 600 *mesh*. A operação com a última lixa foi realizada 12 horas antes do início do ensaio de modo a garantir uma maior estabilização da camada natural de óxido característica do material formada sob a peça ao contato com o oxigênio atmosférico. Uma área exposta igual a 0,5 cm² foi delimitada na superfície da peça, em que o entorno foi vedado com esmalte base incolor e cera mel para garantir o isolamento elétrico da região. O contato elétrico da peça foi mantido pela ligação de um cabo elétrico, posicionado na face traseira, recoberto por tinta prata.

Foram selecionados uma malha de platina 80 *mesh* e um eletrodo saturado de Calomelano como eletrodo auxiliar e eletrodo de referência, respectivamente, os quais foram inseridos juntamente no interior do reservatório. Um potenciostato de fabricante BioLogic modelo SP150 foi utilizado como fonte de potencial elétrico no qual, por meio de conectores elétricos, os três eletrodos foram interligados em suas respectivas posições no dispositivo. A bomba submersa foi utilizada para garantir a circulação da solução eletrolítica e o transporte da corrente elétrica entre os eletrodos fixos por um filme adesivo nas paredes internas do reservatório.

Na Figura 3.13 é mostrado um esquema representativo do sistema montado. A fotografia da montagem real do procedimento experimental é mostrada no Apêndice II (por conter diversos itens e fios de conexão na imagem que poderiam confundir o leitor, optou-se por deixá-la registrada no apêndice deste trabalho e não no decorrer de seu desenvolvimento).

Os dados foram adquiridos e posteriormente processados por meio dos programas computacionais *EC Lab*[®] *V10.18* e *EC Lab*[®] *Express V5.4*, respectivamente, em que foi definida

uma variação de potencial com base no eletrodo de Calomelano na faixa entre - 0,4 V a 3,6 V, a uma taxa de 0,5 mV/s, respeitando as limitações equipamento elétrico. Tais valores foram selecionados com base em recomendações definidas na norma ASTM G5-94 (ASTM, 2004).

Preliminarmente ao início do ataque, foi aguardado um tempo de espera aproximado de 15 minutos necessário à estabilização do potencial de circuito aberto. Em seguida, o ensaio foi então iniciado, ilustrando o comportamento da curva por meio da relação entre os valores de corrente alcançados em função da variação de potencial aplicado ao longo do tempo (polarização linear potenciodinâmica). O tempo total de espera até a finalização do procedimento foi de aproximadamente 2 horas e 30 min.

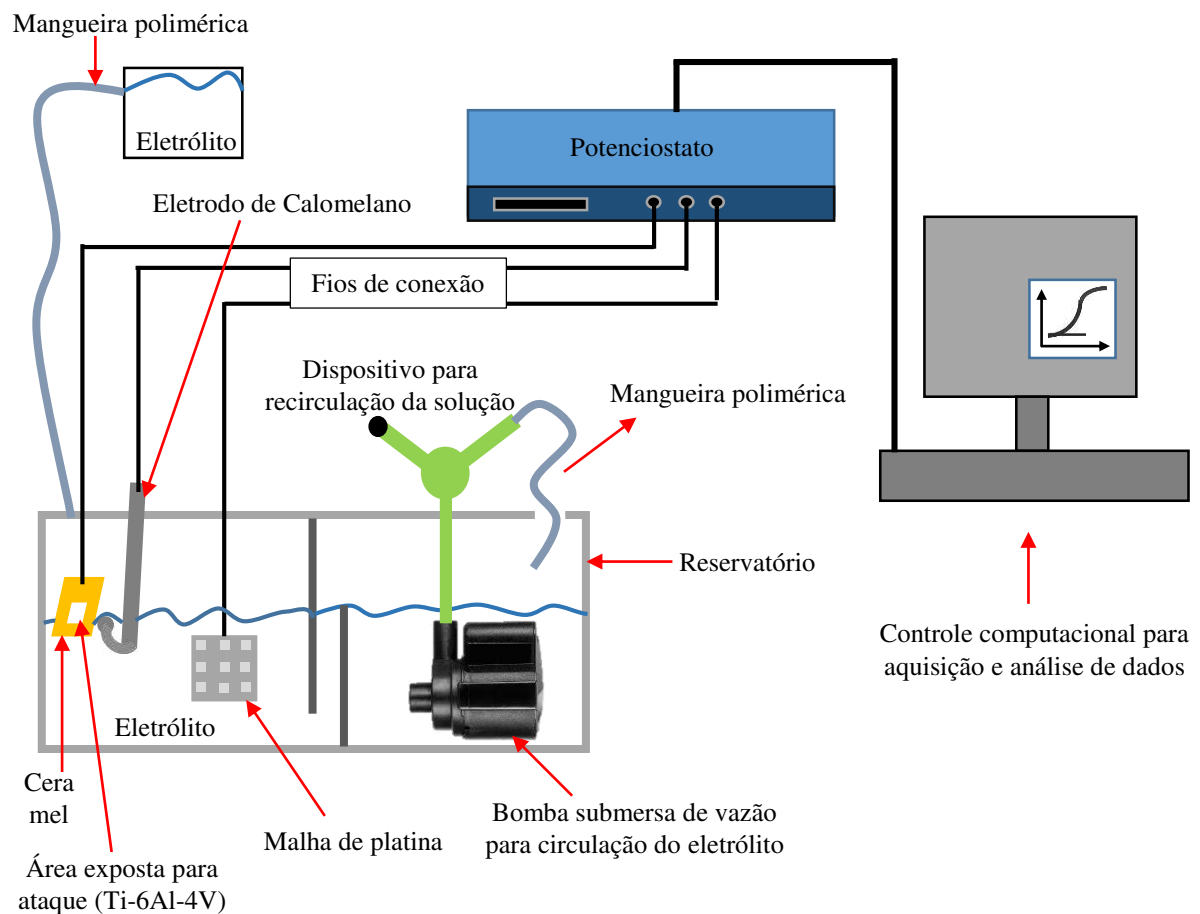


Figura 3.13 - Diagrama esquemático do sistema montado para ensaio da curva de polarização da liga Ti-6Al-4V no LTM da FEMEC (UFU).

3.5.2 Ensaio de passivação do material (preliminares)

Com a finalidade de analisar o comportamento da espessura da camada passivada formada sob a superfície do material, determinando, assim, condições favoráveis ao seu

crescimento, foram realizados preliminarmente seis ensaios eletroquímicos, utilizando-se de uma fonte de tensão de corrente contínua fabricante B&K *Precision*, modelo XLN10014-GL. Para tanto, foram adotados 3 níveis de tensão elétrica e 2 níveis de concentração da solução (H₂O destilada + NaCl), a um tempo de aplicação igual a 1 s, totalizando 6 ensaios, em que a corrente foi mantida aberta durante todas as condições. O tempo de 1 s foi adotado em função da rapidez na formação do filme de óxidos superficial, sendo o menor valor programável da fonte. Os ensaios foram realizados conforme apresentado na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 - Planejamento experimental 3 x 2 referente à determinação do crescimento da camada de passivação da liga Ti-6Al-4V formada sob a superfície da peça.

Experimento	Fator 1 <i>Tensão elétrica [V]</i>	Fator 2 <i>Concentração da solução</i>
1	-1 (2)	-1 (5 %)
2	-1 (2)	1 (10 %)
3	0 (4)	-1 (5 %)
4	0 (4)	1 (10 %)
5	1 (6)	-1 (5 %)
6	1 (6)	1 (10 %)

Baseando-se nos procedimentos experimentais adotados para a determinação da curva de polarização do sistema eletrólito-metal e nos resultados obtidos, a tensão igual a 2 V foi selecionada por se encaixar dentro da região de passivação, objetivo do que se pretende alcançar. Os valores de 4 V e 6 V foram selecionados como múltiplos desse primeiro valor adotado, buscando investigar experimentalmente a influência em se utilizar maiores valores de tensão no comportamento do material como uma continuação da curva para além dos resultados que poderiam ser fornecidos pelo potenciostato durante a polarização, uma vez que o indicativo do prolongamento da curva é de que há novas formações de camada de óxidos. Em relação aos valores de 5 % e 10 % (mantido conforme o ensaio de polarização) para concentração do fluido eletrolítico, buscou-se investigar se a redução no valor deste parâmetro indica uma queda na agressividade do ataque eletroquímico durante as reações.

Deste modo, a preparação inicial das seis peças utilizadas durante os ensaios para cada uma das condições investigadas consistiu no lixamento de todas as faces por meio de papéis de lixa adotando-se o sequenciamento 180 *mesh*, 280 *mesh*, 400 *mesh* e 600 *mesh*. Em seguida, delimitou-se uma área a ficar exposta na face superior da peça com 8 mm de comprimento e 2 mm de altura e também na lateral esquerda de 2 mm (espessura original da peça) por 2 mm (mesma altura selecionada), em que toda região a ficar submersa foi recoberta com filme

polimérico e vedada com esmalte base (incolor) de modo a isolar eletricamente o entorno, concentrando o ataque apenas na parte delimitada (aproximadamente 0,2 cm²), conforme é esquematizado na Fig. 3.14.

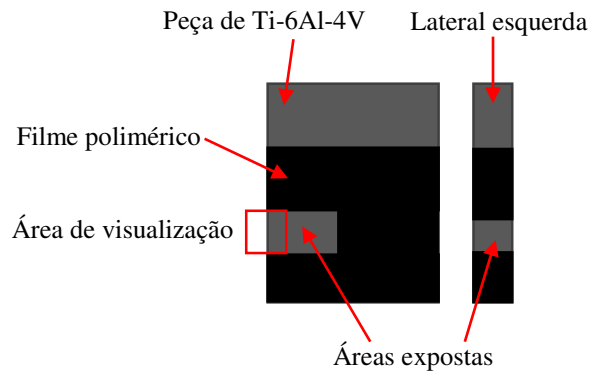


Figura 3.14 - Esquema representativo da delimitação da área a ficar submersa para ensaio eletroquímico de passivação superficial da liga Ti-6Al-4V.

Após a preparação das amostras, os testes foram conduzidos no interior do reservatório de eletrólito, o qual foi utilizado como uma cuba de proteção, em que para cada condição, uma amostra diferente (polo positivo) foi fixada por meio de um suporte manufaturado aditivamente de material isolante (PLA) próximo a uma das paredes da cuba mantendo a região delimitada para o ataque submersa na solução.

O contato elétrico entre peça e fonte foi realizado utilizando-se de um conector elétrico (garra jacaré) preso diretamente na peça (na parte emersa e não isolada). Teste de continuidade foi aplicado empregando-se um multímetro digital Fluke modelo 17b+. Como contra-eletródo (polo negativo) foi utilizado o próprio microrrebolo, a uma distância *gap* definida por um gabarito de aproximadamente de 0,25 mm.

A movimentação do eletrólito, mantido à temperatura de 30 °C, para o transporte da corrente elétrica foi efetuada pela bomba submersa a uma vazão constante de 270 L/h. Após cada ensaio, retirava-se os revestimentos para isolamento elétrico da peça e as superfícies eram limpas com água destilada, secadas e armazenadas.

3.5.3 Determinação da espessura da camada passivada

Um novo diagrama esquemático resumido do passo-a-passo para a determinação da espessura da camada passivada é apresentado na Fig. 3.15.

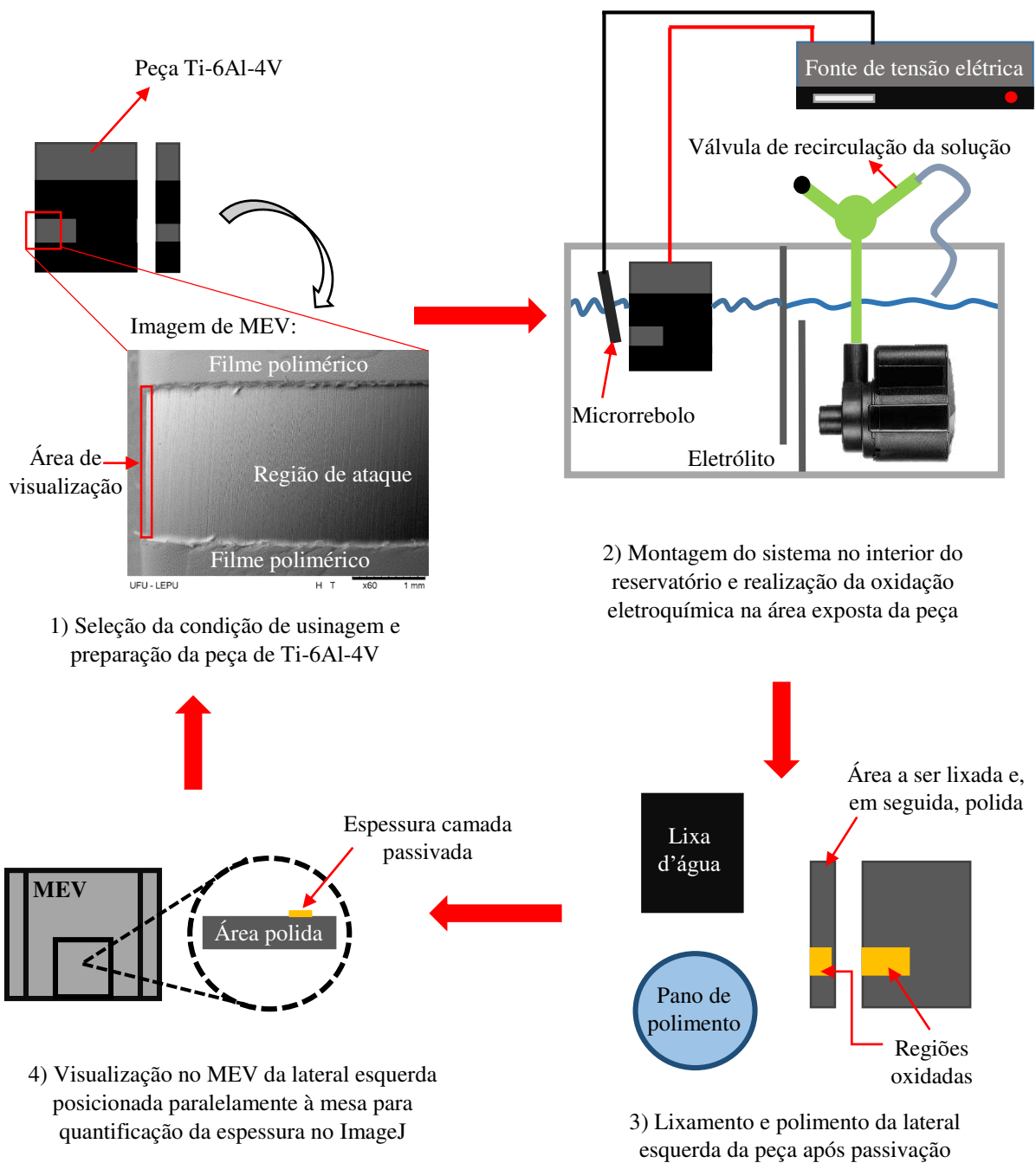


Figura 3.15 - Diagrama esquemático resumido para determinação da espessura da camada de passivação da liga Ti-6Al-4V.

Para tanto, foram obtidas imagens em MEV da seção transversal em cada peça. Para tanto, a lateral esquerda (em que estava delimitada uma região de ataque) foi lixada e polida. Nestas operações, foram utilizadas sequencialmente papéis de lixa 180 *mesh*, 280 *mesh*, 400 *mesh*, 600 *mesh*, 1 200 *mesh* e 2 000 *mesh*, e para o polimento, realizado em uma Politriz modelo PLF

de fabricante FORTEL, à rotação de 125 rpm, utilizou-se de duas pastas de diamante concentradas tipo S, fornecidas pela Teclago, com granulação de 1,00 μm e 0,25 μm , nessa ordem. As pastas foram utilizadas em panos específicos para a granulometria indicada, adquiridos também pela empresa Teclago, de diâmetros de 200 mm.

Assim, após a etapa de polimento, cada peça foi posicionada paralelamente à base da mesa de apoio dentro do microscópio de modo que a vista fornecida mostrava a região polida e a espessura da camada de passivação formada sob a superfície superior, possibilitando a sua quantificação por meio do *software* de medição ImageJ. Destaca-se que foi realizado também a análise em espectrometria por raio-X (EDS) para determinar os elementos químicos de composição e as suas respectivas concentrações nas camadas formadas.

3.6 Ensaios eletroquímicos e o processo híbrido

Buscando correlacionar as operações eletroquímica e abrasiva, inicialmente as superfícies de 9 amostras foram preparadas por meio do lixamento conforme abordado nos ensaios puramente mecânicos. Os suportes em aço (9 unidades) foram utilizados para cada uma das peças e o posicionamento da lixa efetuado sob uma mesa de desempenho, promovendo condições iniciais homogêneas entre os ensaios.

Em seguida, o princípio da reação eletroquímica foi utilizado como agente modificador da superfície, sem agir para remoção de material, em que foi produzido um filme único de passivação sob cada peça, empregando-se uma fonte de tensão elétrica externa de corrente contínua. Reafirma-se que para cada amostra, uma única condição foi realizada em toda a face superior da peça. Com isto, objetivou-se a formação de uma camada determinística de subprodutos caracterizada por menor resistência mecânica que o material base original, ativamente controlada em resposta a variação dos parâmetros eletroquímicos, a qual foi avaliada em cada condição investigada quanto à composição e espessura dimensional.

As peças passivadas foram então posteriormente submetidas à usinagem mecânica de microcanais por meio de novos ensaios de microrretificação realizados na minimáquina. Deste modo, foi possível averiguar a influência, em termos microestruturais e de acabamento superficial resultante, da modificação prévia de uma superfície metálica por passivação, antes da mesma ser submetida ao ensaio mecânico (microrretificação assistida por eletroquímica), associando os processos eletroquímico e mecânico (técnica híbrida).

3.6.1 Passivação do material

Conforme supracitado, para a etapa eletroquímica de oxidação das faces superiores das nove amostras de Ti-6Al-4V, a preparação seguiu os mesmos procedimentos dos ensaios fundamentalmente mecânicos: as amostras foram fixadas cada uma em um suporte metálico aplicando-se adesivo cianoacrilato na superfície inferior posta sob o suporte de modo a isolá-la eletricamente do contato entre ambos. Agrupadas de 3 em 3, as amostras foram posicionadas no porta-peças e efetuado o lixamento da superfície exposta sob o desempenho, com uma lixa d'água de granulometria 180 *mesh*, no mesmo ambiente e condições anteriormente realizado.

Para o contato elétrico entre o polo positivo (Ti-6Al-4V) e a fonte de tensão, inicialmente um parafuso M4 x 0,7 mm de comprimento 45 mm foi inserido na base inferior do suporte de aço de modo que o seu aperto no furo roscado foi efetuado até ser atingido o contato físico com a camada do adesivo cianoacrilato em que a peça estava fixa. Neste momento, aplicava-se um maior torque para que a extremidade do parafuso ultrapassasse a camada do adesivo e encostasse na parte inferior da peça sem removê-la do suporte, garantindo o contato elétrico entre ambos. Um aparato mecânico mantinha o conjunto parafuso-suporte-peça alocado no interior do reservatório, de tal modo que a região exposta (de ponta-cabeça) ficava submersa na solução. Ao corpo do parafuso, acoplou-se um fio com um conector elétrico (garra jacaré) cuja outra extremidade se encontrava conectada diretamente na fonte de tensão. Na Figura 3.16 é apresentado o esquema dessa montagem.

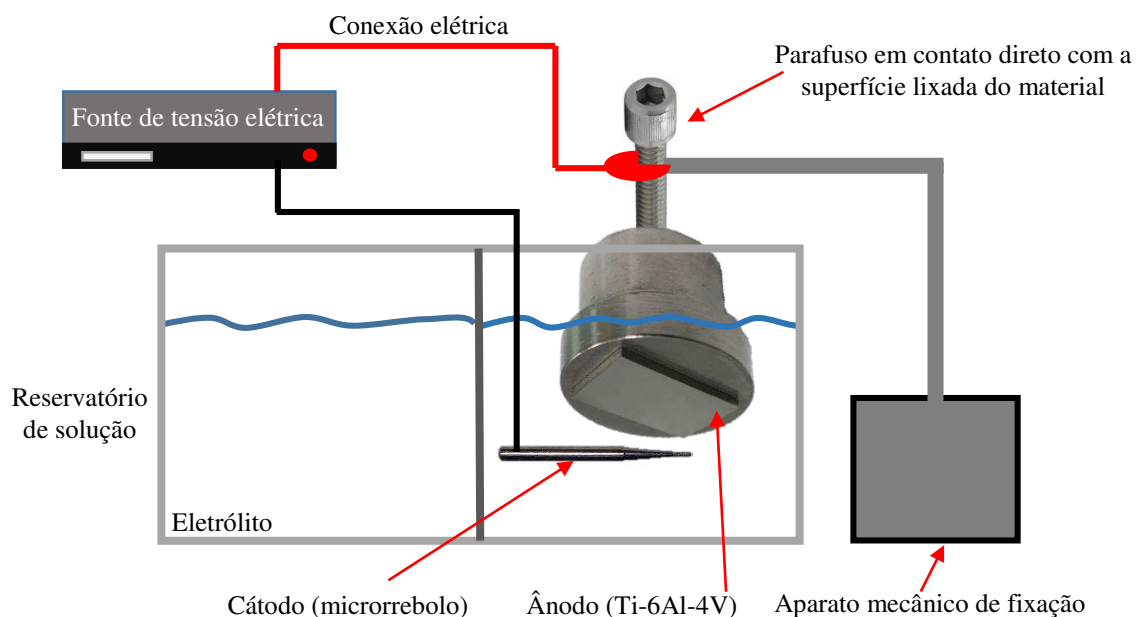


Figura 3.16 - Esquema de posicionamento suporte-peça, destacando a conexão elétrica com a fonte de tensão para passivação da superfície.

Por meio do multímetro, conferiu-se para cada ensaio a conexão elétrica entre a área de ataque e o parafuso (interligado à fonte), viabilizando o desenvolvimento do mesmo. Além disso, os entornos do suporte de aço em que a peça foi fixada foram vedados com filme polimérico, evitando qualquer influência externa à superfície exposta, sendo essa a única região condutora de eletricidade do conjunto suporte-peça.

Com a utilização de um diferente aparato mecânico, posicionou-se o microrrebolo (pólo negativo) no interior do reservatório em meio aquoso, mantendo-o a uma distância constante aproximada de 1,0 mm da superfície da peça durante todos os ensaios. O mesmo foi conectado diretamente à fonte de tensão elétrica por meio de um conector elétrico (garra jacaré) preso à sua haste. Quanto à solução eletrolítica, selecionou-se a mesma composição H₂O destilada mais sal (NaCl 5 %), à temperatura controlada de 30 °C.

Os ensaios foram conduzidos de acordo com o planejamento experimental apresentado na Tab. 3.4, totalizando 9 ensaios, em que a corrente foi liberada para o limite da fonte (14 A) para que o seu valor não atuasse como limitante durante o desenvolvimento dos testes. Foi avaliado como parâmetro elétrico os valores de tensão elétrica em e tempo de passivação em 3 níveis cada, o primeiro em 2 V, 4 V e 6 V, e o segundo em 1 s, 10 s e 20 s, visando identificar o comportamento no crescimento da camada passivada durante a variação dos parâmetros.

Tabela 3.4 - Planejamento 3 x 3 para passivação da superfície em peças da liga Ti-6Al-4V.

Ensaio	Fator 1 <i>Tensão elétrica [V]</i>	Fator 2 <i>Tempo de passivação [s]</i>
1	-1 (2)	-1 (1)
2	-1 (2)	1 (10)
3	-1 (2)	0 (20)
4	0 (4)	-1 (1)
5	0 (4)	1 (10)
6	0 (4)	0 (20)
7	1 (6)	-1 (1)
8	1 (6)	1 (10)
9	1 (6)	0 (20)

Para uma melhor visualização do ensaio, a bancada experimental montada no LEMETRO da FEMEC (UFU) com todos os componentes desenvolvida para a realização dos testes de passivação, em que se encontram uma fonte elétrica, termostato, bomba submersa, cuba, mangueira de silicone, conectores elétricos, conector hidráulico e um sistema de controle numérico pelo qual eram programadas as condições definidas, é exibida na Fig. 3.17.

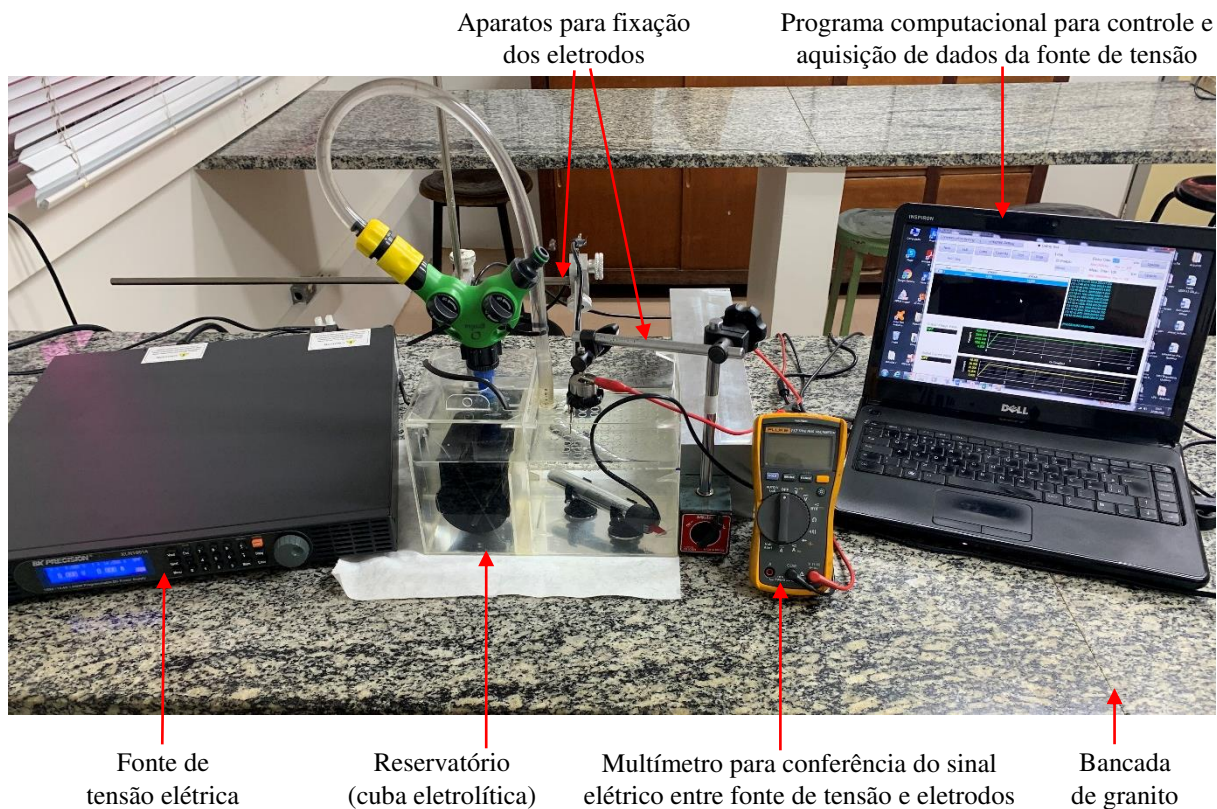


Figura 3.17 - Bancada experimental para realização dos ensaios de oxidação superficial nas amostras de Ti-6Al-4V no LEMETRO da FEMEC (UFU).

Após cada ensaio, as superfícies passivadas foram lavadas com água destilada e álcool isopropílico, nessa ordem, para remover vestígios de sal que podem aderir na superfície da peça e, em seguida, secadas e armazenadas. Para determinação da espessura da camada passivada, as peças foram descoladas dos suportes e efetuado o lixamento e o polimento das laterais esquerda em cada condição, conforme abordado no subitem 3.5.3 (com a diferença que neste caso as faces superiores das peças foram completamente oxidadas). Ao final, posicionando-as com a lateral esquerda paralela à mesa do MEV, obteve-se as imagens laterais para medição por meio do *software* ImageJ da espessura da camada passivada.

Feito isso, para eliminar quaisquer impurezas e influências do polimento e do próprio manuseio durante a determinação das espessuras das camadas passivadas, as amostras foram submetidas a novas preparações superficiais de lixamento e passivação eletroquímica, mantendo-se os mesmos parâmetros e condições de ensaio, sendo em seguida armazenadas para posterior etapa de usinagem mecânica (microrretificação).

3.6.2 Microrretificação assistida por eletroquímica

Após a passivação em diferentes condições das superfícies das amostras da liga Ti-6Al-4V, as mesmas foram submetidas à microrretificação, cujos ensaios foram realizados no Laboratório de Microusinagem da FEMEC (UFU), segundo a montagem do sistema representado na Fig. 3.8.

Microcanais foram fabricados para comparação quanto aos resultados preliminarmente obtidos em processo fundamentalmente mecânico. Mantiveram-se inalterados os valores de profundidade de corte a_p e velocidade de avanço V_w de acordo com a condição em que foi encontrado o menor valor de rugosidade Ra , iguais a 5 μm e 30 mm/min, respectivamente. A variação da velocidade de corte em 3 níveis (1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s) foi mantida.

Em cada uma das 9 amostras passivadas foram usinados 6 microcanais, totalizando 54 microcanais. Os 3 primeiros canais seguiram a mesma metodologia dos ensaios de microrretificação em amostras não passivadas: as amostras fixas a um suporte de aço foram posicionadas em uma morsa de alumínio, uma a uma, de modo que, por meio de um relógio comparador acoplado à estrutura do cabeçote da minimáquina, foi realizado o nivelamento da amostra pelo ajuste nos parafusos Allen sem cabeça até ser atingindo valores próximos à resolução do instrumento de medição nas direções X e Y da mesa da máquina, aproximadamente 1 μm . Os canais foram então usinados de acordo com o planejamento 3 x 1 x 1 (V_s em 3 níveis, a_p e V_w constantes), para um comprimento de aproximadamente 7 mm.

No caso dos outros 3 canais, inicialmente foi produzido um desnivelamento na amostra ajustando-se manualmente os parafusos Allen sem cabeça na base metálica de alumínio na ordem de + 5 μm no eixo X da direita para a esquerda, cujo controle de precisão foi conduzido pela utilização do relógio comparador. Este valor foi adotado com base na profundidade de corte adotada para a fabricação dos 3 primeiros microcanais. A ferramenta de corte foi então referenciada na lateral direita da amostra, para que o programa numérico então iniciasse a usinagem com um a_p próximo de 0 micrometros e percorresse toda a área de trabalho (comprimento da amostra) com um a_p variável.

O procedimento de desnivelamento da superfície buscou identificar variações quanto a presença de rebarbas e a qualidade da usinagem ao considerar o aumento da profundidade de corte até o valor de 5 μm durante a fabricação dos canais, similar ao aplicado na análise de mecanismos dúctil-frágil em materiais de difícil usinagem. Foram obtidas imagens em MEV e realizada a medição da rugosidade fraccionando o comprimento usinado em regiões de mesma dimensão (conforme apresentado no próximo item deste capítulo). Na Figura 3.18 é mostrado

um esquema representativo do ensaio, com a ferramenta posicionada na região de profundidade considerada nula e a sua faixa de deslocamento na superfície da amostra destacando o desnivelamento produzido com base na posição de entrada do microrrebolo.

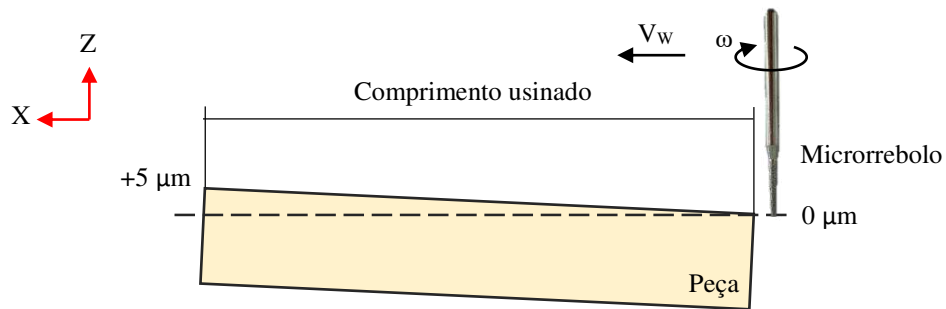


Figura 3.18 - Representação da operação de microrretificação de microcanais com a_p variável até $+5 \mu\text{m}$.

Na Figura 3.19 é apresentada a situação final após a realização dos ensaios de microrretificação nas faces passivadas das amostras de Ti-6Al-4V. São destacadas a usinagem dos 6 microcanais e as condições eletroquímicas utilizadas para passivação em cada uma das 9 amostras. A mudança na coloração das superfícies representa a situação real obtida durante os ensaios, em que os tons amarelados relacionados à formação do filme de óxidos induzido se tornavam mais pigmentados quando da utilização de maiores valores de tensão e/ou tempo de aplicação mais longos.

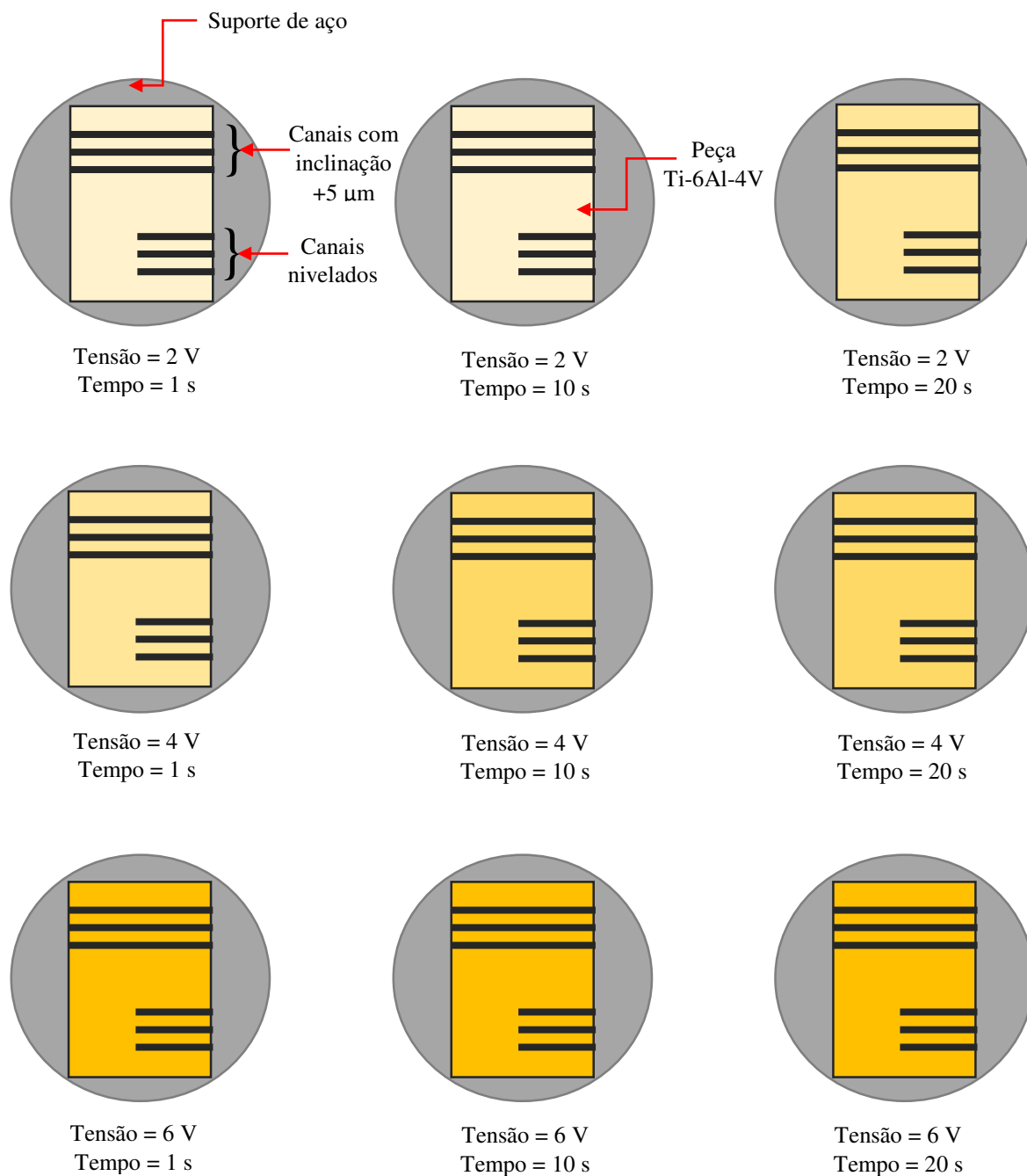


Figura 3.19 - Representação dos ensaios de microrretificação assistida por eletroquímica realizado nas nove amostras preparadas.

3.7 Medições e análises

Neste tópico são apresentados os procedimentos adotados para avaliação qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos e os instrumentos de medição utilizados para a análise.

3.7.1 Rugosidade

O acabamento superficial das amostras usinadas foi avaliado por meio de um perfilômetro *Form Talysurf Intra50* do fabricante Taylor Hobson®, com resolução de 16 nm na faixa de medição de 1 mm e apalpador cônico-esférico com ponta de diamante de raio igual a 2 µm. O perfilômetro, localizado no Laboratório de Microusinagem da FEMEC (UFU), possui certificado de calibração nº 0001/2018, emitido pelo LEMETRO da FEMEC - UFU, vide ANEXO I. Este certificado declara uma incerteza expandida associada à calibração do instrumento de 0,02 µm para um fator de abrangência k igual a 2,39 e probabilidade de abrangência de 95 %.

De modo a apresentar maiores informações a respeito das superfícies usinadas, durante a medição foram coletados e armazenados os valores dos parâmetros de amplitude R_a (desvio aritmético médio do perfil), R_q (desvio médio quadrático do perfil), R_p (altura máxima do pico do perfil), R_v (profundidade máxima do vale do perfil), R_z (altura máxima do perfil) e R_t (altura total do perfil). Em conformidade com a norma ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008), foram utilizados valores de *cut-off* de 0,80 mm (compreendendo um comprimento de avaliação igual a 4,00 mm) e 0,25 mm (comprimento de avaliação 1,25 mm), com base nos resultados de R_a , sendo utilizado filtro Gaussiano para eliminação das ondulações do perfil durante todas as condições investigadas. Conforme apresentado em Whitehouse (1994) *apud* Motta-Neto (2017), a escolha do filtro em questão parte da característica do mesmo em amenizar a amplitude do sinal, dando mais suavidade aos contornos da superfície.

A coleta e processamento dos dados foram realizadas por meio do programa computacional *µltra Surface Finish V5*, fornecido pelo fabricante do respectivo perfilômetro. Equipamento e amostras foram posicionados em um desempenho de granito suspenso por molas para isolar o sistema de medição e a peça de influências externas de vibração mecânica transmitida pelo solo. Todas as medições foram realizadas em uma temperatura ambiente de $20,0\text{ °C} \pm 1,0\text{ °C}$, de forma a atender a ABNT NM-ISO 1 (1997), em que as amostras e o instrumento de medição (ligado) foram deixados doze horas à temperatura especificada para que fosse atingido o equilíbrio térmico.

Nos microcanais produzidos com as superfícies niveladas, bem como nas amostras passivadas, foram efetuadas 5 leituras ao longo de seus comprimentos, obedecendo a trajetória do apalpador perpendicular às marcas dos sulcos gerados. Nos microcanais fabricados nas amostras em que foi produzido um desnivelamento na superfície de + 5 μm (condição de a_p variável), de maneira excepcional, foi adotado o valor de *cut-off* igual a 0,08 mm (menor valor fornecido pelo perfilômetro utilizado), mesmo que tal valor não obedecesse à norma em vigência, para que fosse percorrido uma maior quantidade de intervalos representativos da superfície ao longo da extensão do perfil de modo a identificar possíveis variações da rugosidade com a_p .

3.7.2 Incerteza de medição

De modo a validar qualitativamente os resultados das medições e contribuir para a rastreabilidade dos mesmos, foi calculada a incerteza de medição para cada um dos parâmetros de rugosidade investigados. Conforme procedimento teórico detalhado por este mesmo autor em Motta-Neto (2017), a determinação do respectivo valor de incerteza de medição, por meio do proposto no método GUM (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição), seguiu o passo-a-passo mostrado a seguir. Em princípio de exemplificação, foram consideradas 5 leituras obtidas para o parâmetro de rugosidade R_a referente às condições definidas no experimento 1 de acordo com o planejamento fatorial da Tab. 3.1. São elas: 0,137 μm , 0,127 μm , 0,138 μm , 0,136 μm e 0,141 μm .

O cálculo das incertezas-padrão u associadas às variáveis de entrada (variabilidade das leituras fornecidas pelo perfilômetro $\bar{x}(Med)$, resolução do perfilômetro $\Delta Resol$, incerteza associada à calibração do perfilômetro ΔIC , raio da ponta do apalpador ΔA_R e deformação do material durante a medição ΔD) é apresentado na Tab. 3.5, classificadas de acordo com o tipo de avaliação correspondente (A ou B).

Tabela 3.5 - Cálculo das incertezas-padrão de medição para cada grandeza considerada.

Grandeza	Tipo de Avaliação	Incerteza-padrão u [μm]
$\bar{x}(Med)$	A	$u(\bar{x}(Med)) = \sqrt{\frac{s^2}{num}} = \sqrt{\frac{0,1358 \mu\text{m}}{5}} = 0,00226$
$\Delta Resol$	B	$u(\Delta Resol) = \frac{Resol}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,016 \mu\text{m}}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00462$
ΔIC	B	$u(\Delta IC) = \frac{U_{calibração}}{k} = \frac{0,02 \mu\text{m}}{2,39} = 0,00837$
ΔA_R	B	$u(\Delta A_R) = \frac{0,02 \cdot \bar{x}(Med)}{\sqrt{3}} = \frac{0,02 \cdot 0,1358 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,00157$
ΔD	B	$u(\Delta D) = \frac{D}{\sqrt{3}} = \frac{0,02 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,01155$

Em seguida, a incerteza padrão combinada foi calculada conforme representado na Eq. 3.7.

$$u_c(Ra_1) = \sqrt{(0,00226)^2 + (0,00462)^2 + (0,00837)^2 + (0,00157)^2 + (0,01155)^2}$$

$$u_c(Ra_1) = 0,01524 \mu\text{m} \quad (3.7)$$

Por fim, para a determinação da incerteza expandida U e a representação do resultado de medição, em função do número de leituras ser reduzido (< 30), determinou-se o valor do fator de abrangência correspondente k baseado no grau de liberdade efetivo da incerteza-padrão de medição, cujo cálculo é definido pela equação de *Welch-Satterwaite*, associado à tabela *T-student*. Para este caso, o valor de k encontrado foi igual a 1,98.

Deste modo, na Eq. 3.8 é apresentada a determinação da incerteza expandida associada à medição e, por conseguinte, o resultado para o parâmetro Ra_1 na condição especificada como a média das leituras mais ou menos U , para um nível de abrangência de aproximadamente 95 %.

$$U(Ra_1) = 0,01524 \mu\text{m} \cdot 1,98 = 0,03017 \mu\text{m}$$

$$Ra_1 = 0,136 \pm 0,031 \mu\text{m} \quad (3.8)$$

3.7.3 Análise estatística

Objetivando investigar a influência dos parâmetros de corte considerados na produção de efeitos significativos nas variáveis de resposta (parâmetros de rugosidade), foi realizada uma avaliação estatística utilizando-se da técnica de Análise de Variância (ANOVA), por meio do *software* Statistica 7.0. Nesta técnica, foi adotada uma distribuição F (*Fischer-Snedecor*) pela

qual o valor de p (denominado probabilidade de significância) indica a probabilidade de que seja verificada uma determinada alteração na variável dependente na situação em que a variável independente não interfira na variável dependente. Assim, os fatores considerados produzem efeitos significativos nos parâmetros de rugosidade quando p é menor que 0,05 (nível de significância de 5 %). Caso isto ocorra, pode-se concluir que existe uma relação linear entre a variável dependente (Ra , Rq , Rv , Rp , Rz , Rt) e as variáveis independentes (Vs , ap e Vw).

3.7.4 Avaliação por microscopia eletrônica e EDS

A análise qualitativa da integridade superficial das amostras usinadas, bem como a caracterização das microferramentas, foram realizadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo HITACHI TM3000 fabricado pela empresa *Hitachi High-Technologies Corporation*. Para tanto, o posicionamento das amostras e das ferramentas foi inicialmente conferido em gabaritos que simulavam a dimensão interna da cabine do equipamento, com distâncias de trabalho que variavam em torno de 5 mm. Aplicou-se a tensão de aceleração dos elétrons de 15 kV e detecção de elétrons secundários. O equipamento se encontra localizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da FEMEC (UFU).

Também foram realizadas análises do mecanismo de remoção do material e espessura da camada passivada em um MEV de fabricante *Zeiss* modelo EVO MA10, e de composição elementar em um detector de espectroscopia de energia dispersiva por Raio-X (EDS) da marca *Oxford* modelo 51-ADD0048, a uma tensão de operação de 20 kV, distância de trabalho igual a 10 mm e detecção de elétrons secundários. Ambos também foram utilizados para avaliar a produção das camadas de passivação durante os ensaios eletroquímicos, em que se considerou uma tensão de operação também de 20 kV e distâncias de trabalho entre 8,0 mm e 10,5 mm. O equipamento se encontra localizado no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) na UFU.

3.7.5 Integridade estrutural da ferramenta

Durante os ensaios preliminares, avaliou-se o desgaste do microrrebolo por meio de sua perda mássica, empregando-se de uma balança analítica de fabricante Sartorius modelo MC210-P, com resolução de 0,00001 g e faixa nominal 210 g, localizada no LTM da FEMEC (UFU). Foram realizadas 5 leituras da massa considerando a condição inicial (ferramenta nova) e a condição pós-ensaio.

A análise estrutural das ferramentas foi avaliada por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (HITACHI TM 3000) em que, ao final de cada canal fabricado na amostra, retirava-se o microrrebolo do cabeçote da minimáquina e o analisava no MEV para investigação de avarias como desprendimento e/ou fratura das partículas abrasivas, destacamento do ligante, adesão de material e quebra. Ao ser detectada a adesão, foi efetuado o avivamento da superfície da ferramenta por meio de uma ferramenta abrasiva (SiC) encostada manualmente sob a face do microrrebolo em rotação (30 000 rpm), expondo as arestas de corte.

3.7.6 Perfilometria 3D

Além dos perfis de rugosidade adquiridos por meio da medição com contato, foi realizada a aquisição das topografias tridimensionais dos microcanais usinados nas amostras passivadas (com ap constante e com ap variável), de modo a caracterizar, de forma mais detalhada, as superfícies obtidas. Instalado também no LTM da FEMEC (UFU), a aquisição dos dados foi realizada por meio de um perfilômetro sem contato a *LASER* UBM modelo KF3, com resolução vertical de 20 nm e faixa de medição de 1 000 μm , sensor confocal, sistema de movimentação com repetibilidade unidirecional de 0,5 μm e faixa nominal dos eixos X e Y de 100 mm.

Na situação dos canais fabricados a um ap constante, foi selecionada uma área de varredura de 6,5 mm x 5,0 mm para a avaliação do comprimento usinado. No caso de ap variável, a área foi ampliada para 10,5 mm x 5,0 mm. Previamente à obtenção de cada topografia, posicionou-se cada amostra individualmente no interior do suporte porta-amostras alocado sob a mesa de medição do equipamento e realizado o seu referenciamento, o qual foi conferido adotando-se a velocidade máxima de translação do perfilômetro, igual a 30 mm/min. Para o ensaio, essa velocidade se reduzia drasticamente com base na programação própria do equipamento, em que os ensaios de varredura para o conjunto de 3 canais em cada amostra demoravam em torno de 9 horas para ap constante, e 16 horas para o variável. A análise dos dados coletados foi efetuada por meio do programa computacional *MountainsLab Premium 9*.

3.7.7 Software *MountainsLab Premium 9*

Além do tratamento de dados referentes às topografias superficiais adquiridas pela medição com o perfilômetro 3D (sem contato), para uma representação adequada da superfície e a retirada de desníveis não representativos da mesma oriundos do posicionamento da peça sob a mesa de medição do equipamento metrológico (perfilômetro com contato), foi efetuado o nivelamento do perfil bruto (ondulações mais rugosidade). Essa operação, realizada dentro da

plataforma do *MountainsLab*, foi baseada na linha *LS* (*Least Square Straight Line* - Linha dos Mínimos Quadrados), pela qual utiliza-se o método dos mínimos quadrados de modo a obter uma linha média como linha de referência. Uma exemplificação do procedimento é apresentada na Fig. 3.20.

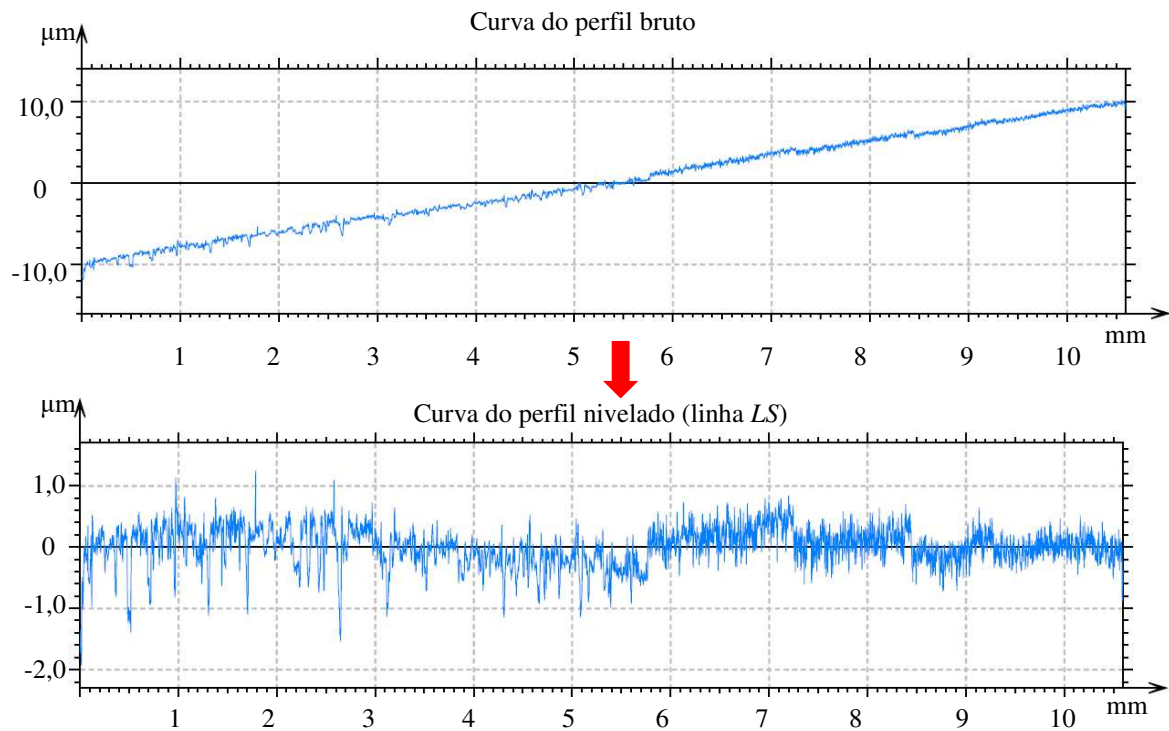


Figura 3.20 - Exemplificação da operação de nivelamento do perfil bruto da superfície por meio do método dos mínimos quadrados (plataforma *MountainsLab 9*).

Ainda com o auxílio do *software*, também foram adquiridas as análises superficiais ao longo dos comprimentos usinados dos canais fabricados com um a_p variável. Foram obtidos o perfil de rugosidade total dentro de cada canal bem como os valores dos parâmetros de rugosidade, determinados via o programa computacional, e os resultados comparados com os obtidos pela medição direta com contato. Complementar à essas informações, para caracterização da superfície, também foi informada a curva de *Abbott-Firestone*, determinada a partir da razão de material do perfil em função da profundidade.

3.7.8 Quadro resumo das variáveis de entrada e saída

Na Tabela 3.6 é apresentado um resumo das variáveis de entrada dos principais processos de usinagem investigados, bem como os respectivos resultados de saída que compuseram as análises para os resultados obtidos.

Tabela 3.6 - Parâmetros e condições de usinagem investigados.

Tipo de ensaio	Parâmetros de entrada		Parâmetros de saída
Microrretificação mecânica	V_s [m/s]	1,35	Ra [μm] Rq [μm] Rz [μm] Rp [μm] Rv [μm] Rt [μm] U [μm] ANOVA MEV
		2,00	
		2,65	
	V_w [mm/min]	30	
		60	
		90	
a_p [μm]	5		
	10		
	15		
Passivação eletroquímica	Tensão elétrica [V]	2	Espessura da camada passivada [mm; nm] MEV-EDS
		4	
		6	
	Tempo de passivação [s]	1	
10			
20			
Microrretificação assistida por eletroquímica (ensaio mecânico em superfícies passivadas eletroquimicamente)	V_s [m/s]	1,35	Ra [μm] Rq [μm] Rz [μm] Rp [μm] Rv [μm] Rt [μm] U [μm] ANOVA MEV Mecanismo de Remoção
		2,00	
		2,65	
	V_w [mm/min]	30	
	a_p [μm]	5	
	Tensão elétrica [V]	2	
		4	
		6	
Tempo de passivação [s]	1		
	10		
	20		

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo abrange os resultados e suas respectivas análises qualitativas e quantitativas desde o estágio de preparação e caracterização das amostras, a qualidade do acabamento em amostras microrretificadas preparadas mecanicamente (lixamento), a avaliação do comportamento eletroquímico da liga Ti-6Al-4V até o crescimento da camada de passivação induzida, como também a influência na rugosidade ao considerar uma preparação prévia eletroquímica de superfícies antes de serem submetidas à usinagem mecânica. Na Figura 4.1 é apresentado um fluxograma resumido das etapas compreendidas neste capítulo.

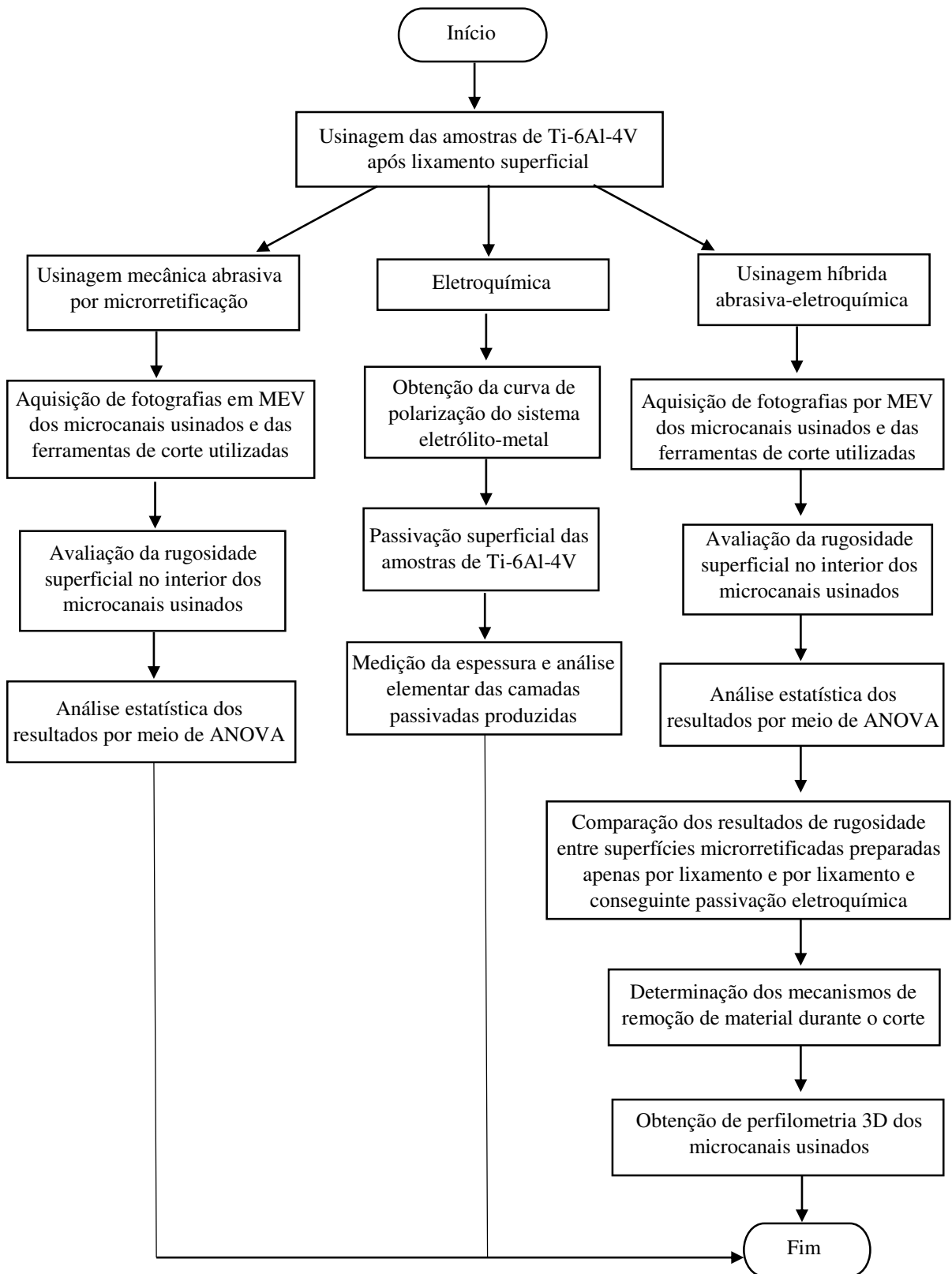


Figura 4.1 – Fluxograma resumido abordando os principais resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa.

4.1 Preparação e caracterização das amostras

Por meio da análise metalográfica foi obtida a microestrutura do material, representada na Fig. 4.2, possibilitando a visualização da combinação entre os estabilizadores α (fase α - tom claro) e estabilizadores β (fase β - tom escuro), característico da liga.

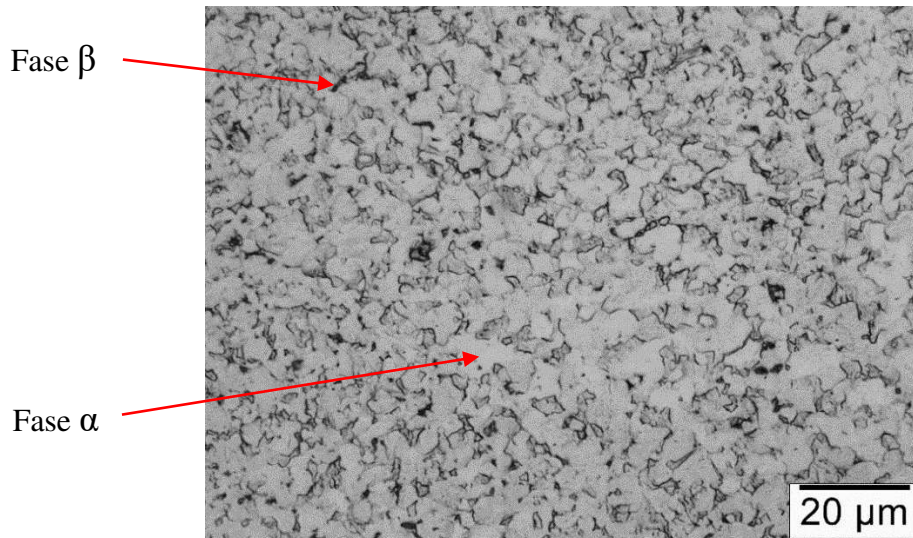


Figura 4.2 - Microestrutura da liga Ti-6Al-4V.

Feito isto, as etapas que sucederam até a determinação de uma condição adequada de preparação das amostras para usinagem, em termos do nivelamento micrométrico necessário após a fixação do conjunto mecânico na mesa da minimáquina, demandaram diversas tentativas quanto ao lixamento das superfícies. Algumas das dificuldades encontradas e erros cometidos são listados a seguir:

- 1) mal posicionamento da lixa, ocasionando remoção não-homogênea na superfície;
- 2) presença de irregularidades sob a mesa de vidro utilizada inicialmente como referência, resultando na falta de paralelismo com a superfície a ser lixada;
- 3) utilização de um suporte inadequado para fixação da amostra, em que amostra não se apoiava inteiramente sob a mesa de referência, promovendo remoção de material localizada nas bordas;
- 4) utilização de um suporte para fixação da amostra fabricado com material mais dúctil que o da liga, o qual apoiado juntamente à superfície a ser lixada, perdia-se a referência da mesa por remover material do suporte mais do que da amostra durante o lixamento;

Após determinada a seleção adequada quanto a utilização de uma mesa de desempenho como referência, ressalta-se que a operação de lixamento foi realizada cautelosamente, à temperatura controlada, obedecendo os mesmos procedimentos durante as diversas repetições necessária à operação, fornecendo, deste modo, o melhor comportamento quanto à minimização do desvio de planeza da amostra que foi inferior a $1\ \mu\text{m}$ ($<$ resolução do relógio comparador).

4.2 Ensaios preliminares de microrretificação - Determinação do modelo de ferramenta

Inicialmente foram obtidas imagens em MEV das microferramentas, exibidas na Fig. 4.3, com o objetivo de investigar a integridade superficial de cada modelo, em que se avaliou quantitativamente o diâmetro e qualitativamente a distribuição, prostrusão, dimensão e geometria das partículas abrasivas diamantadas. A caracterização de cada modelo de microrrebolo (1, 2 e 3) se encontra apresentada no Cap. 3 subitem 3.3.

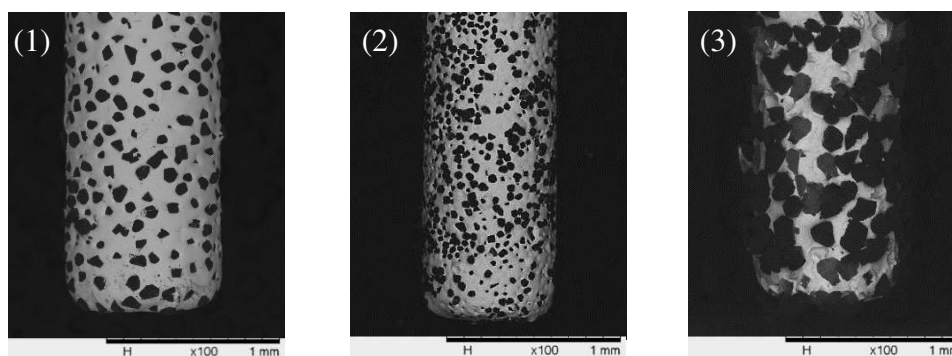


Figura 4.3 - Imagens, em MEV, dos diferentes modelos adquiridos de microrrebolos ou ponta montada, classificados em 1, 2 e 3.

Envolvendo a combinação entre as diferentes condições de corte e a utilização dos 3 modelos de microrrebolos adquiridos, os pré-testes avaliaram individualmente cada parâmetro de corte investigado, em que a seguir são apresentadas e justificadas as condições testadas que não foram utilizadas durante os ensaios definitivos de usinagem nessa pesquisa.

Em relação à V_s , é mostrado na Fig. 4.4 a integridade superficial em vista superior da ferramenta (modelo 1) para uma (a) situação nova, e também após os ensaios de microrretificação considerando uma variação nos valores de rotação impostos em ordem numérica decrescente (60 000 rpm a 15 000 rpm), obtendo-se V_s iguais a (b) 2,65 m/s, (c) 2,00 m/s, (d) 1,35 m/s e (e) 0,7 m/s, para uma mesma V_w de 30 mm/min e a_p de 2 μm .

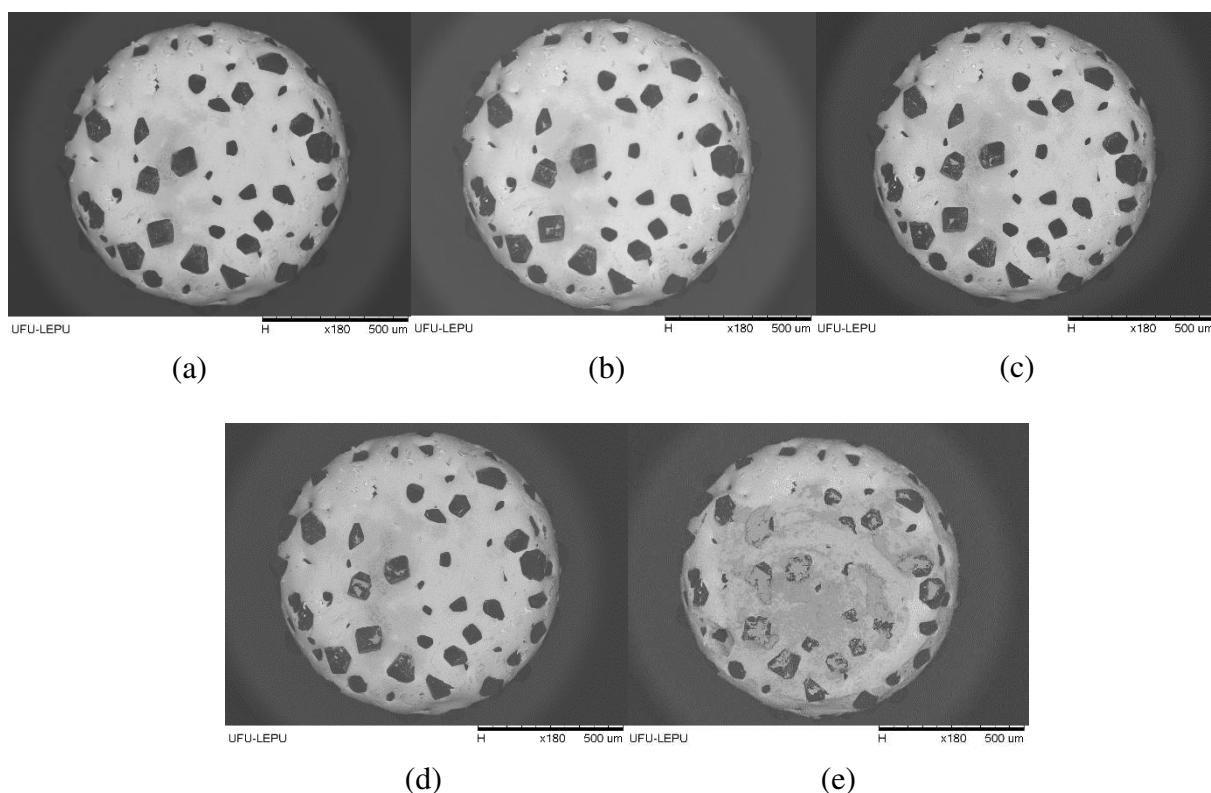


Figura 4.4 - Imagens, em MEV, da superfície do microrrebolo em (a) na condição inicial e após a microrretificação variando-se V_s em (b) 2,65 m/s, (c) 2,00 m/s, (d) 1,35 m/s e (e) 0,70 m/s, para uma mesma V_w igual a 30 mm/min e a_p de 2 μm .

Por meio das imagens apresentadas na Figura 4.4, verificou-se que a adoção de uma menor V_s (rotação igual a 15 000 rpm) resultou em adesão significativa de material da amostra sob a área superficial da ferramenta, prejudicando a etapa de remoção devido ao empastamento das arestas de corte dos abrasivos. Para as rotações acima de 30 000 rpm, entretanto, esse fato não foi observado. Conforme explicado por Chae *et al.* (2006) e Piljek *et al.* (2014), na usinagem em microescala, a redução diametral experimentada pelas microferramentas implica na necessidade em se utilizar maiores rotações de modo a promover um adequado desenvolvimento do processo de corte. Com a aplicação de maiores velocidades, foi possível obter um melhor desempenho do rebolo, sem ocasionar perda de precisão dimensional ou desgaste.

No que se refere à V_w , são mostradas na Fig. 4.5 imagens em MEV dos canais microrretificados (ferramenta modelo 3) considerando, para uma mesma V_s de 1,35 m/s e a_p de 5 μm , V_w iguais a (a) 2,5 mm/min, (b), 5,0 mm/min e (c) 10 mm/min.

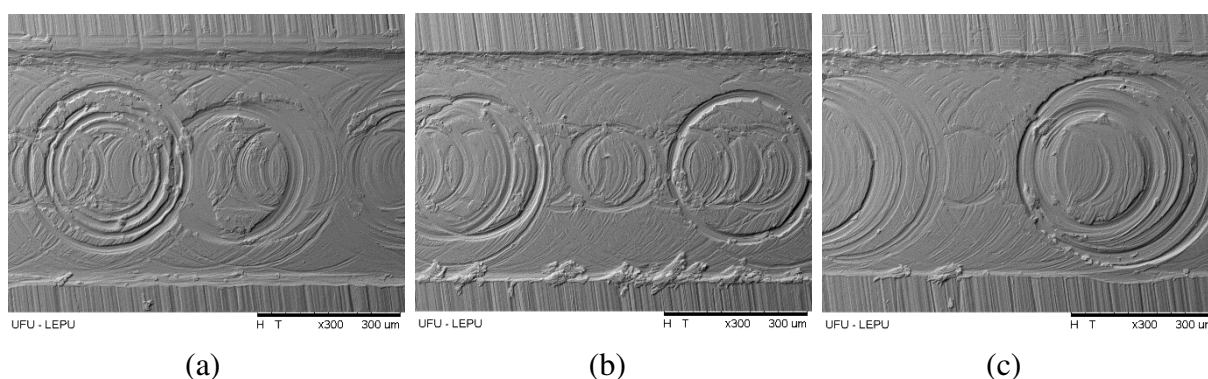


Figura 4.5 - Imagens, em MEV, dos canais usinados adotando-se V_w igual a (a) 2,5 mm/min, (b) 5,0 mm/min e (c) 10,0 mm/min, para um mesmo a_p de 5 μm e V_s de 1,35 m/s.

Na usinagem realizada em condições de baixo avanço foram identificados ruídos estridentes que perduraram durante todo o processo de fabricação, indicando instabilidade na ação de cisalhamento no material. Por meio da avaliação qualitativa dos canais usinados, identificou-se que a ferramenta de corte produziu marcas completas de deslocamento rotativo na superfície com acentuada deformação plástica sem necessariamente envolver a formação de cavaco, arrastando material ao longo da área delimitada pela sua geometria. Embora tenha sido utilizada uma rotação de 30 000 rpm, conferindo V_s de 1,35 m/s (o menor valor estipulado para o desenvolvimento dos testes definitivos), as combinações com as menores V_w mostraram-se inviáveis à fabricação dos microcanais. Acredita-se ainda que essa falta de homogeneidade da usinagem também esteja relacionada à influência do *chatter* em decorrência do maior tempo de contato com a superfície do material, resultando em deterioração na qualidade do acabamento.

Tais resultados condizem com o arranjo numérico para determinação dos valores para compor o planejamento quanto à V_w apresentado no Cap. 3 (subitem 3.4.1), definido de acordo com o cálculo da espessura mínima de cavaco não deformado, que indicou a condição mínima igual a 30 mm/min.

Quanto à a_p , a adoção de menores valores iguais a 1 μm e 2 μm demandou o emprego de uma maior quantidade de passes da ferramenta de corte para a fabricação do microcanal considerando o comprimento de usinagem estabelecido na superfície da amostra. Isso se deve aos valores utilizados serem praticamente da mesma ordem de grandeza do desvio de planeza adquirido superficialmente. Deste modo, tais valores foram descartados da avaliação.

Por outro lado, ao se considerar um ap de 25 μm , a utilização dos microrrebolos de modelo 1 e 2 durante a microrretificação se mostrou inviável, como mostrado nas imagens em MEV nas Figs. 4.6a e 4.6b, respectivamente, das condições pós-usinagem para V_w igual a 90 mm/min e V_s de 2,00 m/s.

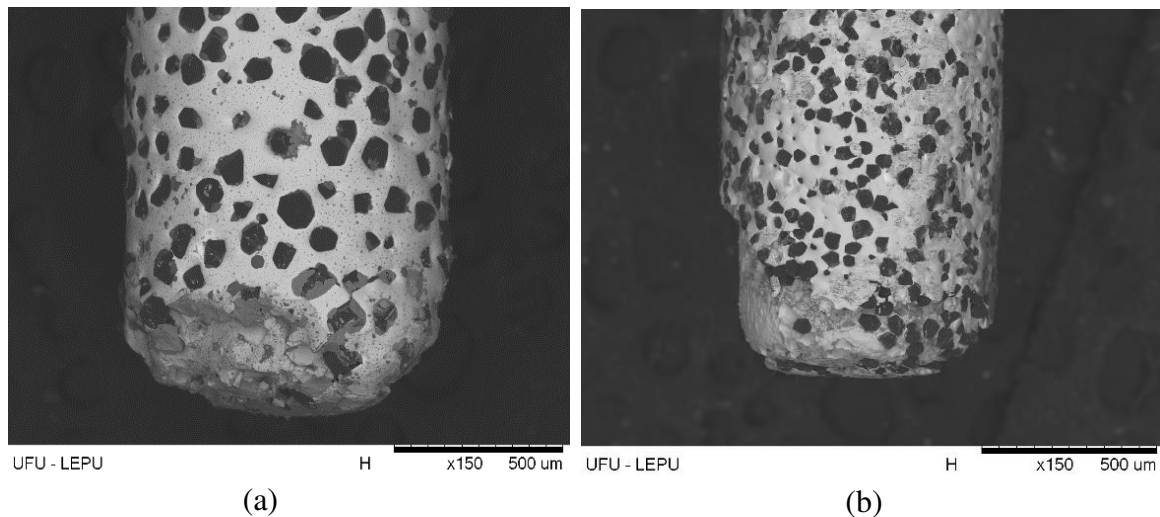


Figura 4.6 - Imagens, em MEV, da ferramenta modelo (a) 1 e (b) 2, após a fabricação de canais microrretificados a um ap de 25 μm , V_w 90 mm/min e V_s 2,00 m/s.

Os microrrebolos se desgastaram em regiões acima da conferida para a usinagem (ap igual a 25 μm), apresentando visível desintegração do ligante e exposição da haste de sustentação do corpo da ferramenta. Não apenas as qualidades inferiores de ambos os modelos de microrrebolo justificam o ocorrido, de acordo com o apresentado por Bissacco *et al.* (2005) e Park (2008), a baixa rigidez mecânica estática e dinâmica em decorrência da redução no diâmetro da ferramenta para processos em microescala, como a própria microrretificação, pode ocasionar maiores deflexões e promover falha catastrófica do microrrebolo durante a formação do cavaco, como resultado da influência do efeito escala.

Deste modo, após o desenvolvimento dos ensaios preliminares, concluiu-se que frente às diferentes associações dos parâmetros de corte e qualidade dos microrrebolos, selecionou-se o modelo 3 para o desenvolvimento dos ensaios definitivos de usinagem. Para exemplificação da decisão, nas Figs. 4.7a, 4.7b e 4.7c são mostrados canais microrretificados pelos microrrebolos modelos 1, 2 e 3, respectivamente, para uma mesma condição de corte definida de acordo com o planejamento fatorial proposto (V_s 2,65 m/s, ap 5 μm e V_w 60 mm/min).

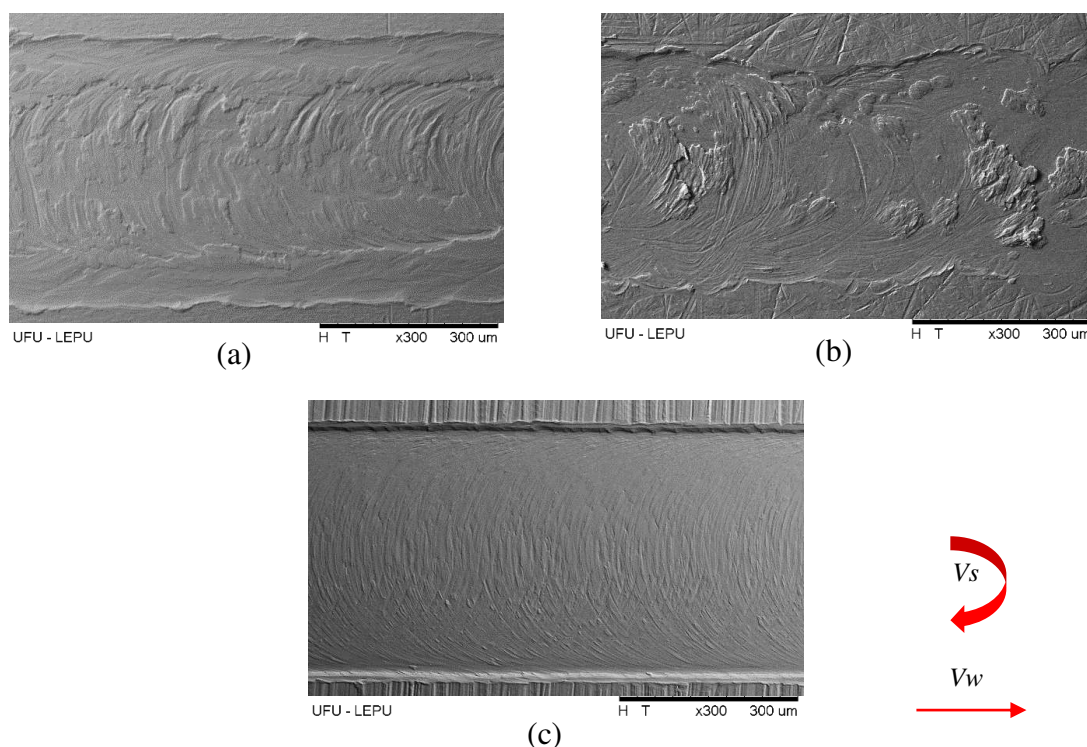


Figura 4.7 - Imagens, em MEV, dos canais usinados considerando a utilização dos microrrebolos modelo (a) 1 - D91, (b) 2 - D46 e (c) 3 - D126, para uma mesma condição de corte (V_s 2,65 m/s, ap 5 μm e V_w 60 mm/min).

Analisando a Figura 4.7, a utilização do microrrebolo modelo 3 (c) resultou na fabricação de microcanais com marcas de avanço regulares e bem definidas, com corte homogêneo ao longo de todo o comprimento usinado, ao contrário dos outros dois microrrebolos, em que a microrretificação foi marcada pelo desenvolvimento de intensas vibrações mecânicas e perda da qualidade de precisão dimensional e geométrica das superfícies produzidas. Embora seja o modelo com as partículas abrasivas de diamante sintético monocristalino de maior granulometria, a sua geometria de ponta cônica favoreceu o desenvolvimento dos ensaios avaliados, garantindo uma maior rigidez mecânica e vida da ferramenta.

Em relação à análise quantitativa do desgaste experimentado pelos microrrebolos durante os ensaios de microrretificação, não foi possível quantificar a redução de massa sofrida pelas ferramentas de corte, uma vez que a perda de abrasivos somada à adesão de material em função da ductilidade da liga usinada, combinadas com uma variação mássica próxima à resolução da balança analítica utilizada, inviabilizaram tal quantificação. Ressalta-se a importância de um futuro desenvolvimento de técnicas que possibilitem e sejam capazes de fornecer uma análise mais adequada do desgaste nos rebolos.

4.3 Avaliação quantitativa e qualitativa dos canais microrretificados ao se considerar as superfícies preparadas mecanicamente

Neste tópico são exibidos os resultados e as análises das medições dos parâmetros de rugosidade avaliados, respaldados por imagens obtidas em MEV dos microcanais usinados e da ferramenta de corte utilizada. A análise estatística dos valores obtidos também é apresentada.

4.3.1 Acabamento superficial dos canais microrretificados

Buscando apresentar uma análise que engloba os diferentes parâmetros de amplitude (pico-vale ou média das coordenadas), nas Figs. 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 são apresentados graficamente os valores médios encontrados para Ra , Rq , Rz , Rp , Rv e Rt , respectivamente, em que são expressos como barra de erros os valores de incerteza expandida (95 %) associados à medição. Nos gráficos são mostrados os resultados para V_s de 1,35 m/s (30 000 rpm), 2,00 m/s (45 000 rpm) e 2,65 m/s (60 000 rpm), respectivamente.

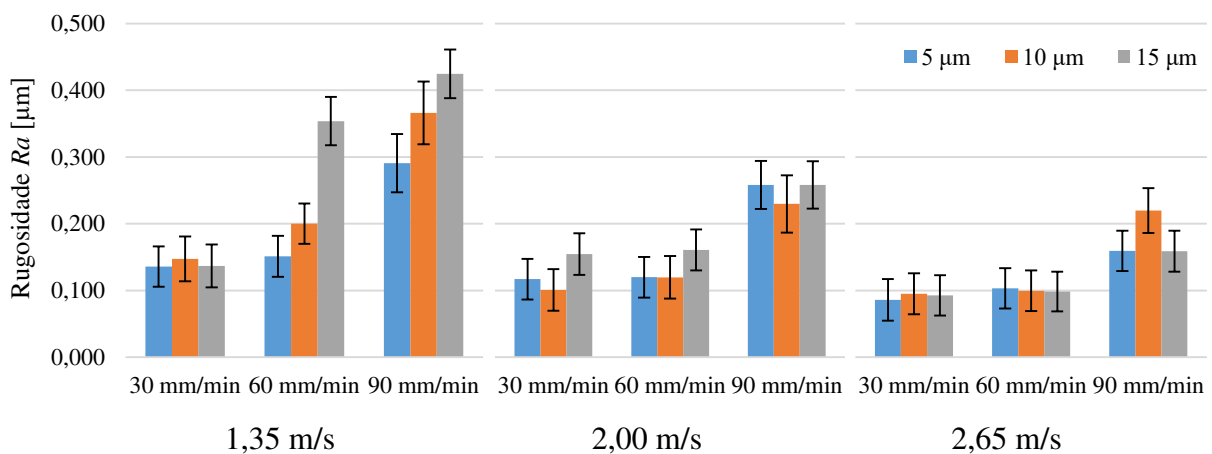


Figura 4.8 - Rugosidade superficial Ra nos canais microrretificados em peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação.

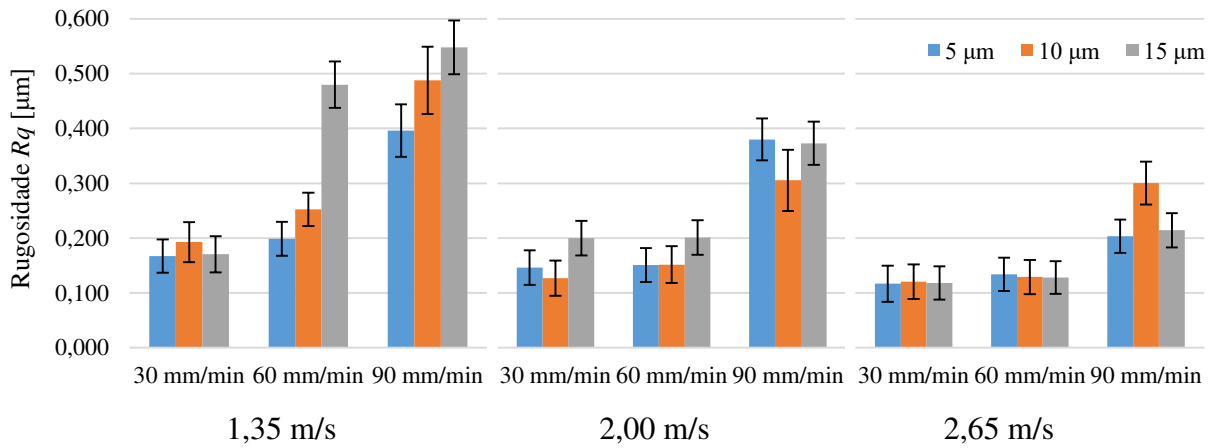


Figura 4.9 - Rugosidade superficial R_q nos canais microrretificados em peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação.

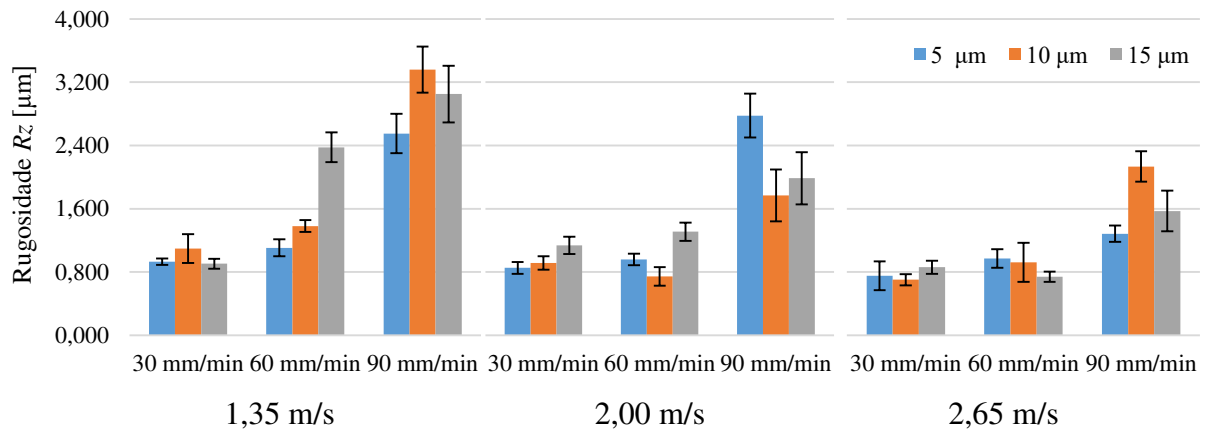


Figura 4.10 - Rugosidade superficial R_z nos canais microrretificados em peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação.

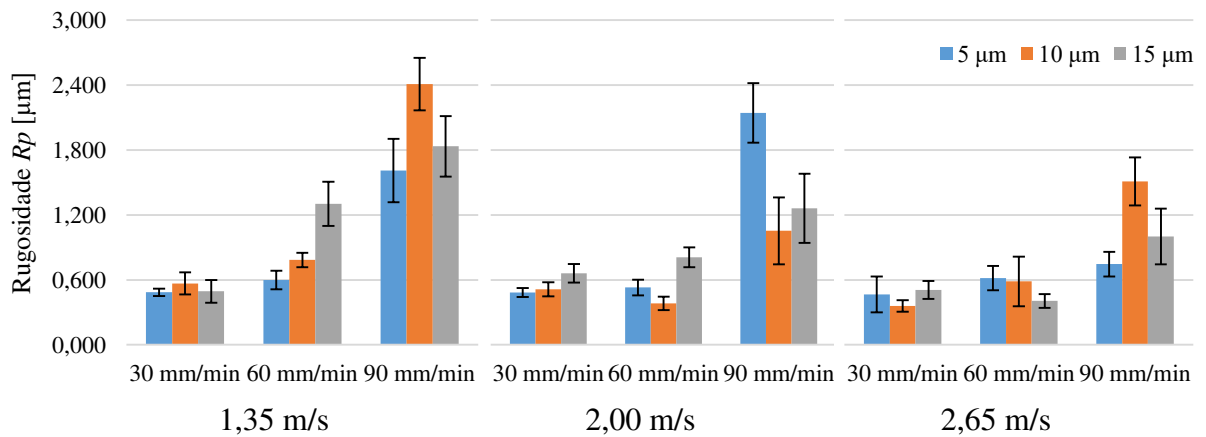


Figura 4.11 - Rugosidade superficial R_p nos canais microrretificados em peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação.

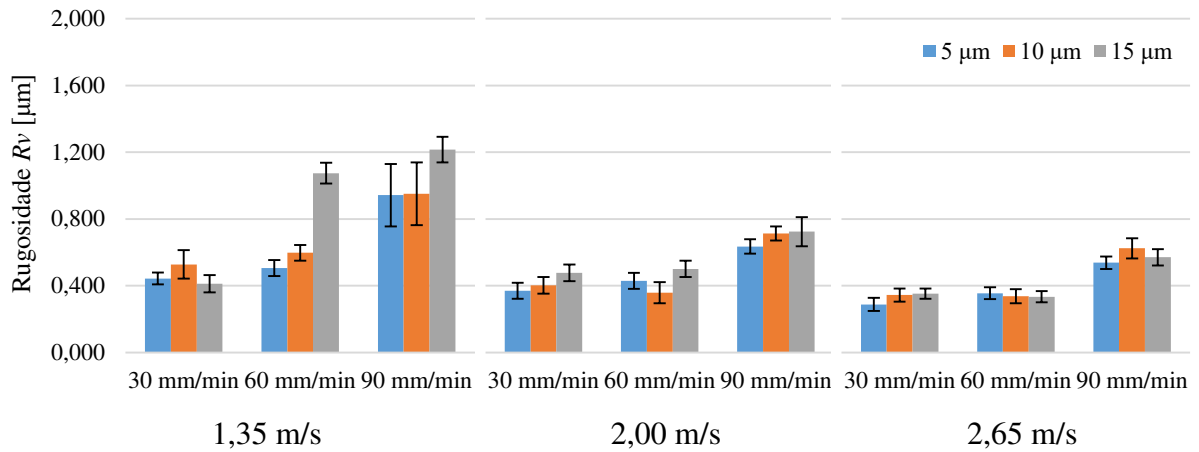


Figura 4.12 - Rugosidade superficial R_v nos canais microrretificados em peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação.

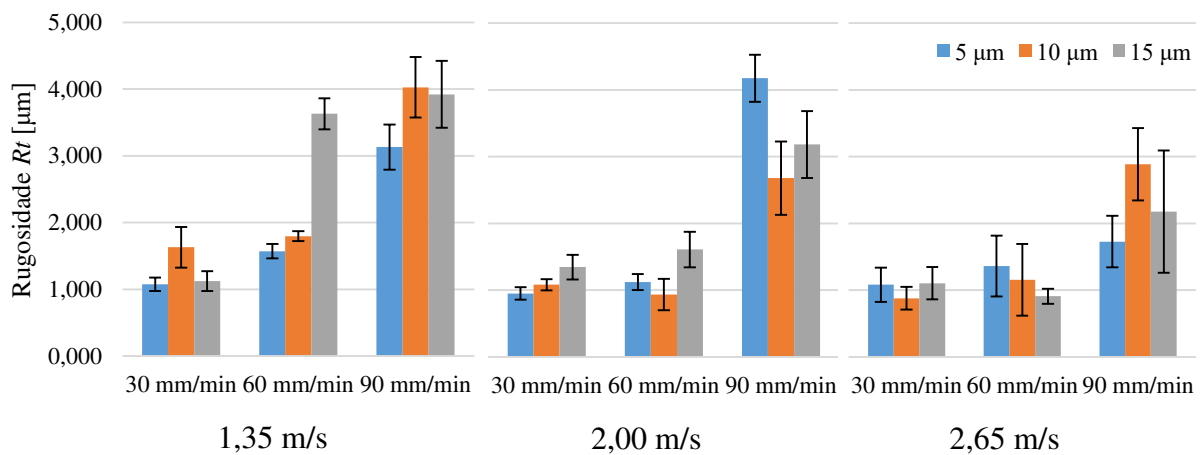


Figura 4.13 - Rugosidade superficial R_t nos canais microrretificados em peças de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente com diferentes parâmetros de microrretificação.

De modo a complementar a análise quantitativa dos valores de rugosidade, nas Figs. 4.14, 4.15 e 4.16 são apresentadas imagens centrais dos canais microrretificados, obtidas em MEV, divididas de acordo com as condições de corte consideradas, referindo-se ao conjunto de experimentos com base nos valores V_s adotados, 1,35 m/s (30 000 rpm), 2,00 m/s (45 000 rpm) e 2,65 m/s (60 000 rpm), respectivamente.

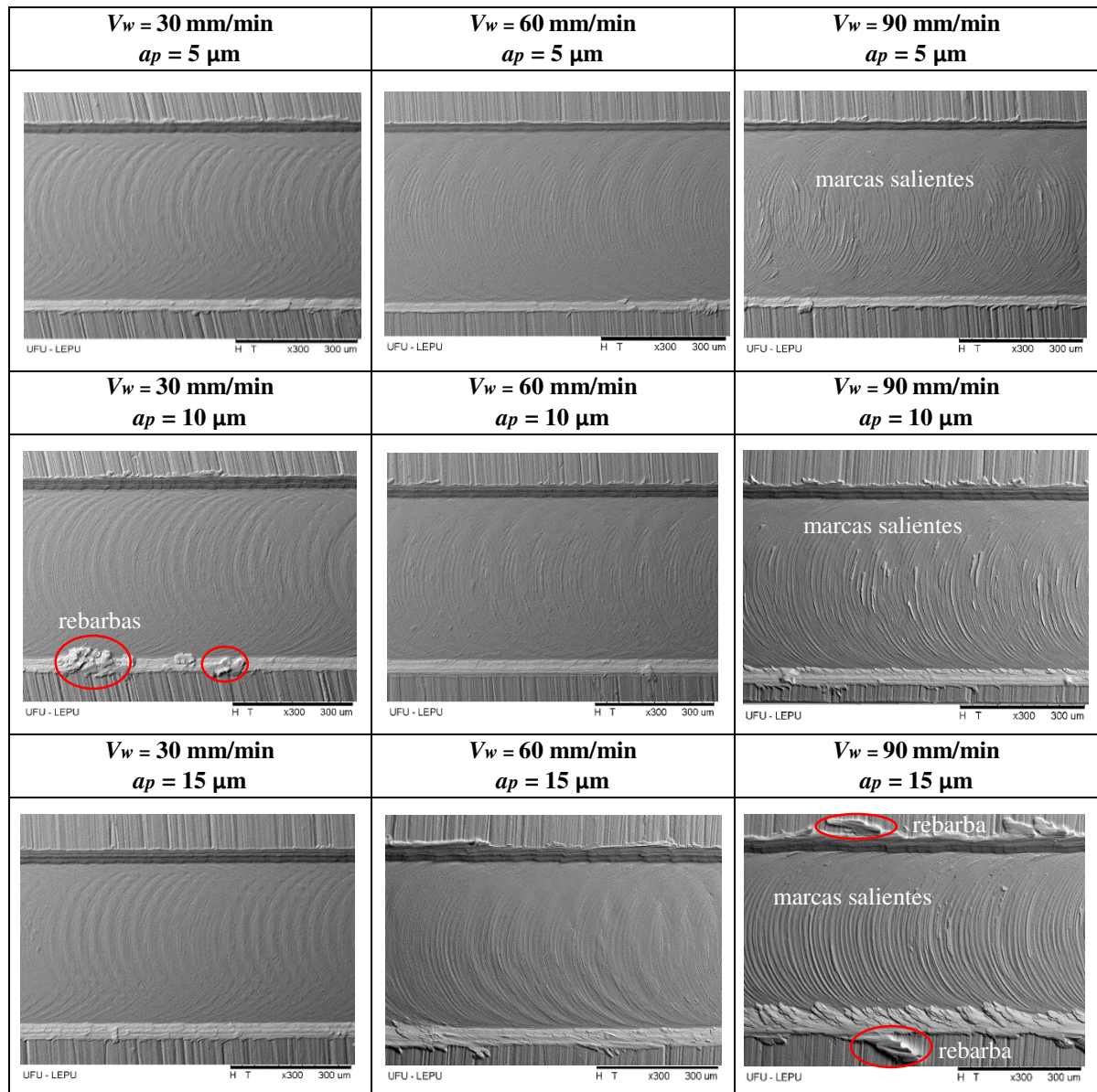


Figura 4.14 - Imagens, em MEV, dos microcanais usinados a um V_s de 1,35 m/s (30 000 rpm) para diferentes a_p (5 μm , 10 μm e 15 μm) e V_w (30 mm/min, 60 mm/min e 90 mm/min).

Verificou-se, portanto, que os maiores valores de rugosidade R_a foram encontrados em menores velocidades de corte. O pior acabamento superficial (R_a) foi obtido na condição de a_p 15 μm e V_w 90 mm/min, sendo igual a 0,425 μm (valor médio), podendo ainda alcançar 0,461 μm , com base na tolerância definida pela incerteza de medição. Destaca-se que embora os valores de R_q sejam maiores que os valores de R_a por evidenciar os picos e vales presentes superficialmente ao elevar ao quadrado o valor das ordenadas, ressaltando-os, o comportamento dos resultados obtidos foi semelhante para ambos os parâmetros.

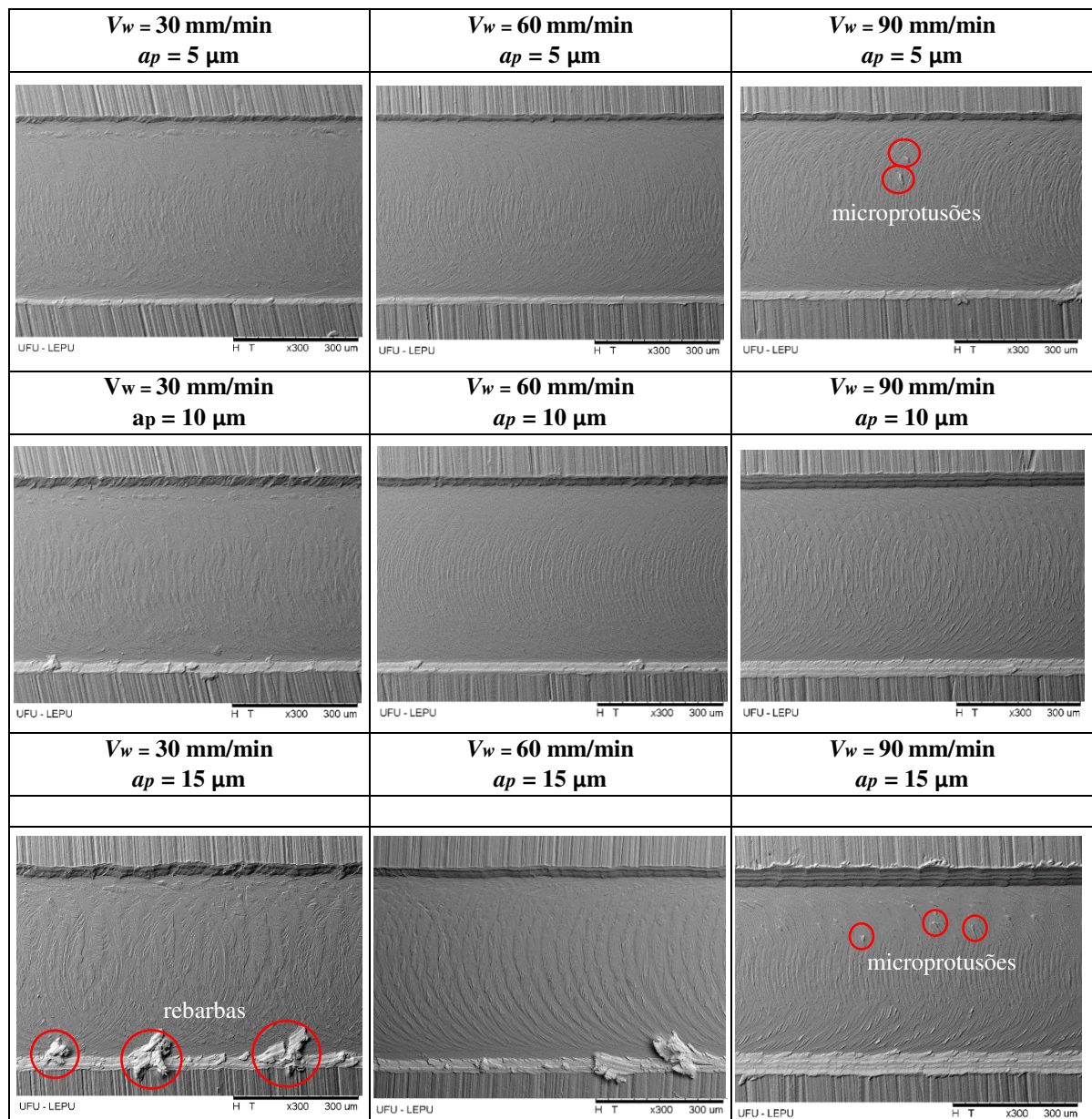


Figura 4.15 - Imagens, em MEV, dos microcanais usinados a um V_s de 2,00 m/s (45 000 rpm) para diferentes a_p (5 μm , 10 μm e 15 μm) e V_w (30 mm/min, 60 mm/min e 90 mm/min).

Pelas imagens mostradas na Figura 4.14, nota-se que, tendo em vista a terceira coluna referente a V_w 90 mm/min, a operação de cisalhamento pelo microrrebolo durante a usinagem produziu marcas de avanço grosseiras, sendo mais intensa para a_p de 15 μm , em que material foi acumulado em direção às bordas do canal. Especificamente nessa condição ainda, foi encontrada a maior profundidade R_v .

Tal combinação entre alta velocidade de avanço a uma maior quantidade de material removido, aliadas à baixa rotação, pode ter estimulado um maior escoamento de material, em que a espessura de corte não tenha sido suficiente para produzir cavaco, o que pode estar

associada ao efeito escala. Como resultado, segundo Ya-Dong *et al.* (2018), eleva-se a pressão específica de corte em função de maiores esforços para cortar o material, causando aumento da rugosidade, produzindo rebarbas mais acentuadas ao longo do comprimento do canal.

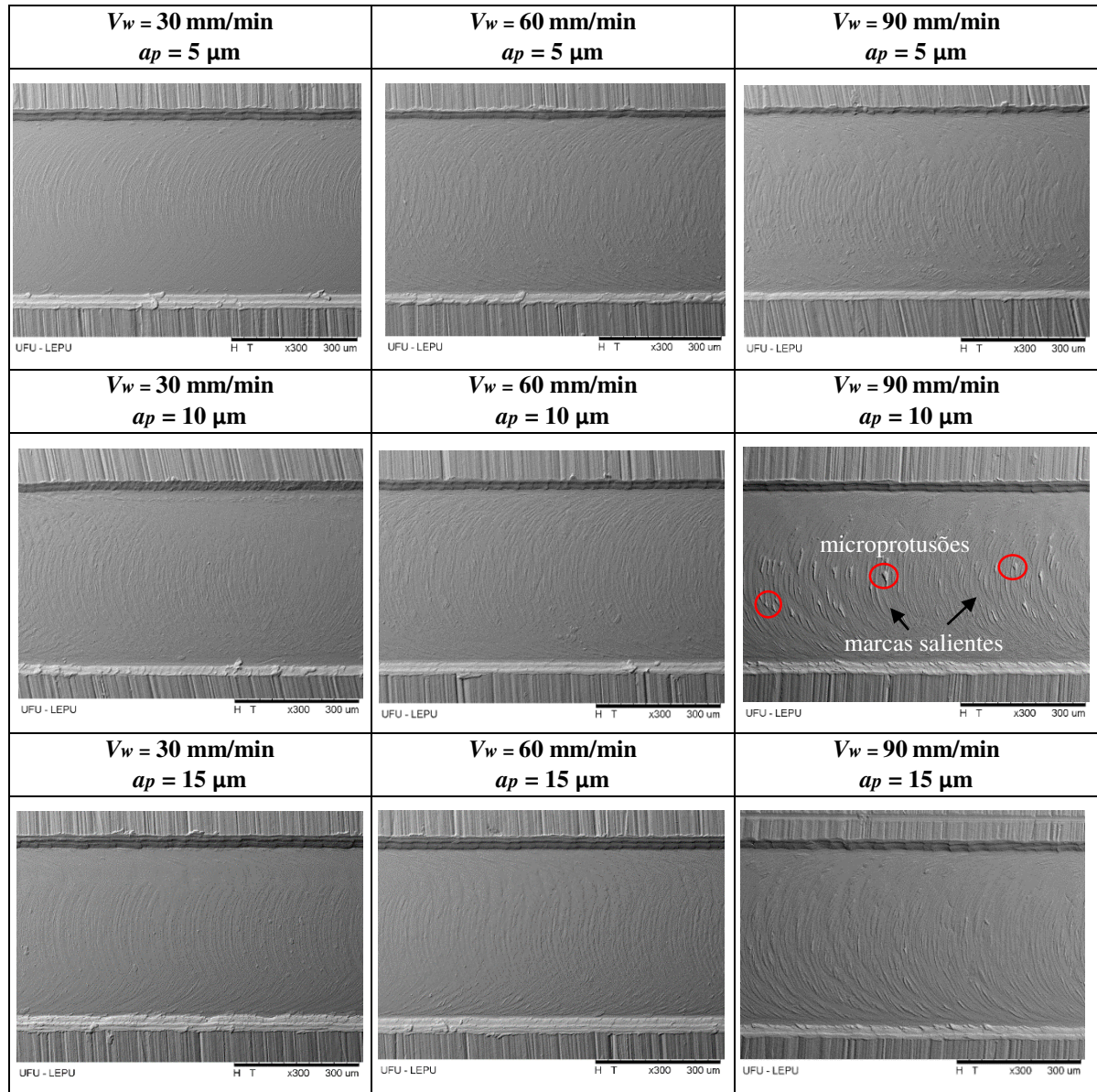


Figura 4.16 - Imagens, em MEV, dos microcanais usinados a um V_s 2,65 m/s (60 000 rpm) para diferentes a_p (5 μm , 10 μm e 15 μm) e V_w (30 mm/min, 60 mm/min e 90 mm/min).

A saliência dos sulcos produzidos justifica os altos valores obtidos de R_p (varia com o avanço), na faixa média de 1,609 μm a 2,408 μm , influenciando diretamente nos resultados de R_z (no comprimento de amostragem) e, conseqüentemente, R_t (no comprimento total de avaliação), este último cujo maior valor médio foi obtido para o a_p de 10 μm , igual a 4,023 μm ,

indicando a soma entre o pico mais alto e vale mais profundo do perfil de rugosidade. No caso de a_p igual a 5 μm , observou-se ainda irregularidades na direção das marcas de avanço, as quais podem ser decorrentes da ocorrência de vibrações mecânicas durante a usinagem.

A utilização de uma maior velocidade de avanço (90 mm/min) associada à menores velocidades de corte (1,35 m/s) resultou em uma usinagem de baixa qualidade, produzindo superfícies de maior rugosidade, conforme visto graficamente pela Fig. 4.8. Esse comportamento também foi observado nos estudos de Cheng *et al.* (2013) e Jing e Cheng (2017), que alegam ser resultado da influência do efeito escala na microrretificação.

Com a utilização de menores V_w , a usinagem se tornou mais homogênea, com marcas de avanço mais uniformes e orientadas de acordo com a cinemática do processo. Para a velocidade de avanço de 30 mm/min, os valores obtidos de R_a assim como dos demais parâmetros de rugosidade não apresentaram variações expressivas com o aumento da profundidade de corte. Todavia, não foi possível definir um comportamento único de variação entre os parâmetros de rugosidade e a_p .

Ao se considerar a V_w de 60 mm/min, todavia, notou-se uma tendência definida de piora do acabamento com o aumento da profundidade de corte. Esse crescimento expressivo no valor da rugosidade em todos os parâmetros principalmente ao adotar a_p igual a 15 μm pode estar relacionado com a adesão de material da peça sobre as partículas abrasivas em função da baixa usinabilidade da liga, afetando negativamente a ação de cisalhamento das arestas cortantes. Ainda, em maiores profundidades, prevê-se um aumento na espessura do cavaco em função da maior quantidade de material removido, no qual em função do microrrebolo eletrolítico apresentar uma camada única de abrasivos engastados no ligante, o alojamento de cavacos pelo rebolo é também prejudicado. Nas Figuras 4.17a, 4.17b e 4.17c são exibidas as integridades superficiais do microrrebolo após as condições de a_p 5 μm , 10 μm e 15 μm , respectivamente para V_w de 60 mm/min. Posteriormente, a ferramenta foi avivada para utilização e substituída depois de finalizado os ensaios para a V_s em questão.

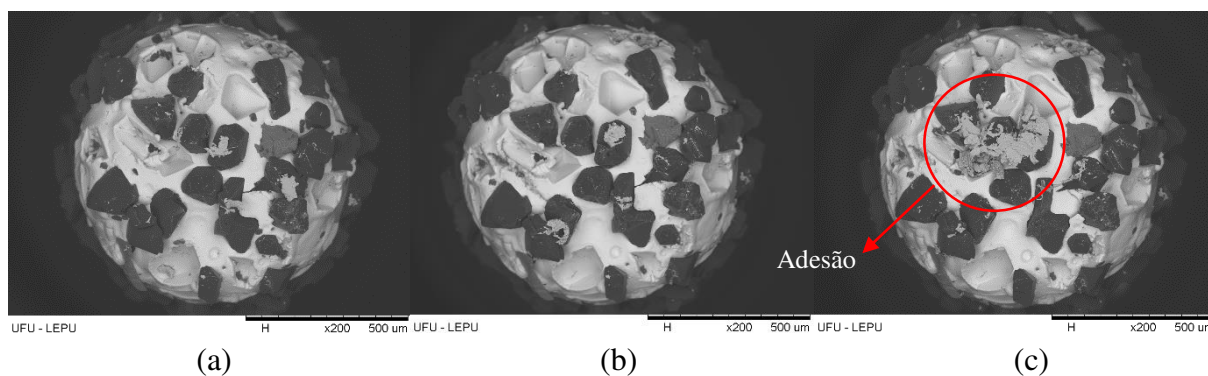


Figura 4.17 - Integridade superficial do microrrebolo após a usinagem considerando uma profundidade a_p de (a) 5 μm , (b) 10 μm e (c) 15 μm , à V_s de 1,35 m/s e V_w 60 mm/min.

Com o aumento da rotação de 30 000 rpm para 45 000 rpm, e conseqüentemente de V_s de 1,35 m/s para 2,00 m/s, os resultados obtidos para o parâmetro de rugosidade R_a nos canais microrretificados não chegaram a alcançar 0,300 μm , indicando melhora significativa na qualidade do acabamento superficial, comprovando a necessidade em trabalhar com maiores velocidades de corte em compensação à redução diametral nos rebolos dos processos de microusinagem, conforme apontado por Chae *et al.* (2006).

Ao se analisar comparativamente os resultados obtidos para R_a e R_q em V_s 1,35 m/s e V_w 30 mm/min, percebe-se que o comportamento dos parâmetros obtido frente à variação em a_p foi o oposto durante n igual a 45 000 rpm (V_s 2,00 m/s), no qual o pior acabamento foi encontrado para um a_p de 15 μm . Pelas imagens apresentadas na Fig. 4.15, nessa condição, a utilização da maior profundidade da ferramenta atuando sobre a amostra resultou em arrastamento de material sem promover eficientemente o corte, produzindo microsulcos irregulares e desorientados, com intensa deformação plástica em direção às bordas dos sulcos, produzindo maiores rebarbas laterais e resultando em superfície de maior rugosidade.

Um ponto destoante identificado para V_s de 2,00 m/s está no elevado valor médio de R_p (igual a 2,143 μm) e, como consequência direta, também de R_z e R_t , encontrado no ensaio de V_w equivalente a 90 mm/min e a_p de 5 μm . Na Figura 4.18 é exibido o perfil de rugosidade obtido em uma das medidas efetuadas no canal para a condição especificada.

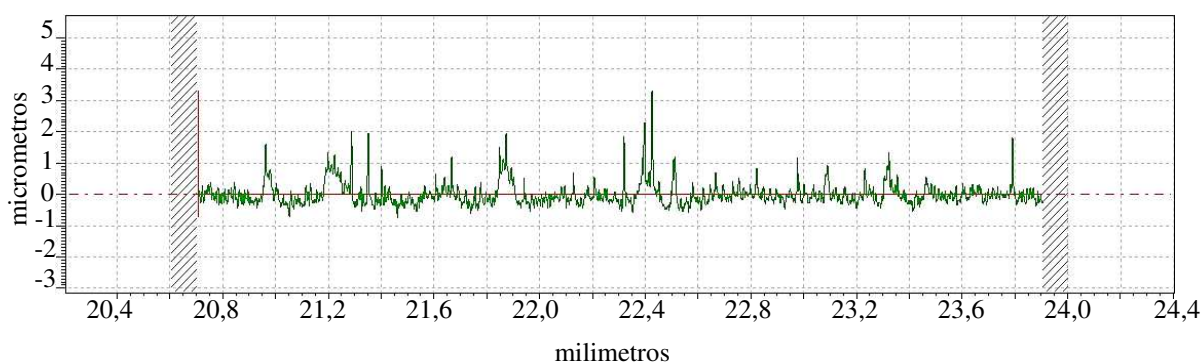


Figura 4.18 - Perfil de rugosidade nivelado e filtrado (Gaussiano) obtido considerando V_s igual a 2,00 m/s, V_w 90 mm/min e a_p de 5 μm .

Percebe-se que em diversos momentos durante a trajetória da ponta do apalpador foram detectados picos recorrentes no perfil de rugosidade ao longo do comprimento de avaliação. Pelas imagens em MEV exibidas na Fig. 4.15, tanto para a condição de a_p igual a 5 μm quanto para de 15 μm , a uma mesma V_w de 90 mm/min, nas quais inclusive foram obtidos os maiores valores médios de R_a para V_s 2,00 m/s (ambos iguais a 0,258 μm), no acabamento final produzido foram encontrados defeitos superficiais pontuais configurados por pequenas partículas de material aderidas no interior do canal, como resultado de deformações plásticas superficiais da peça. Ao ser realizada a medição do perfil, tais asperezas podem ter sido detectadas como picos, fornecendo, assim, maiores alturas lidas.

Os menores valores de rugosidade superficial foram determinados durante a utilização da maior velocidade de corte considerada, igual a 2,65 m/s (60 000 rpm). O menor valor médio de R_a foi encontrado para V_w 30 mm/min e a_p 5 μm , sendo igual a 0,086 μm , combinando altas rotações a menores V_w , conforme obtido por Cheng *et al.* (2013), Jin e Cheng (2017) e Yin *et al.* (2018). Porém, tais resultados contradizem com o observado por Kadivar *et al.* (2018), no qual durante a microrretificação da mesma liga Ti-6Al-4V em questão, a um V_w de 200 mm/min, os autores identificaram uma relação de crescimento entre a rugosidade e a velocidade de corte, justificando-a devido à menor rigidez mecânica da ferramenta miniaturizada, resultando no desenvolvimento de vibrações mecânicas prejudiciais à qualidade do acabamento superficial.

Nas imagens dos canais usinados para V_s igual a 2,65 m/s (Fig. 4.16) apresenta-se uma redução expressiva na produção de rebarbas nas bordas laterais dos canais em todos os experimentos efetuados.

No caso de V_w 90 mm/min e a_p 10 μ m para V_s 2,65 m/s (60 000 rpm), entretanto, foram detectados defeitos pontuais (aderência de material) aliados à obtenção de marcas de avanço mais salientes, resultando em acabamento de maior rugosidade comparativamente às demais condições investigadas. Esse reflexo na qualidade da superfície, conforme exposto por Feng *et al.* (2012), pode ser resultado da menor rigidez mecânica das ferramentas de corte miniaturizadas. Tal fato também foi discutido nos estudos de Kadivar *et al.* (2018). Entretanto, percebe-se que essa relação depende também dos parâmetros de corte utilizados, sendo intensificada em maiores velocidades de avanço, de modo que a frequência da operação possa aproximar das frequências naturais do sistema, provocando vibrações que promovem um maior desgaste do microrrebolo, semelhante ao *chatter* em processos de macrorretificação.

As imagens em MEV obtidas do microrrebolo antes e após o ensaio especificado são apresentadas na Fig. 4.19.

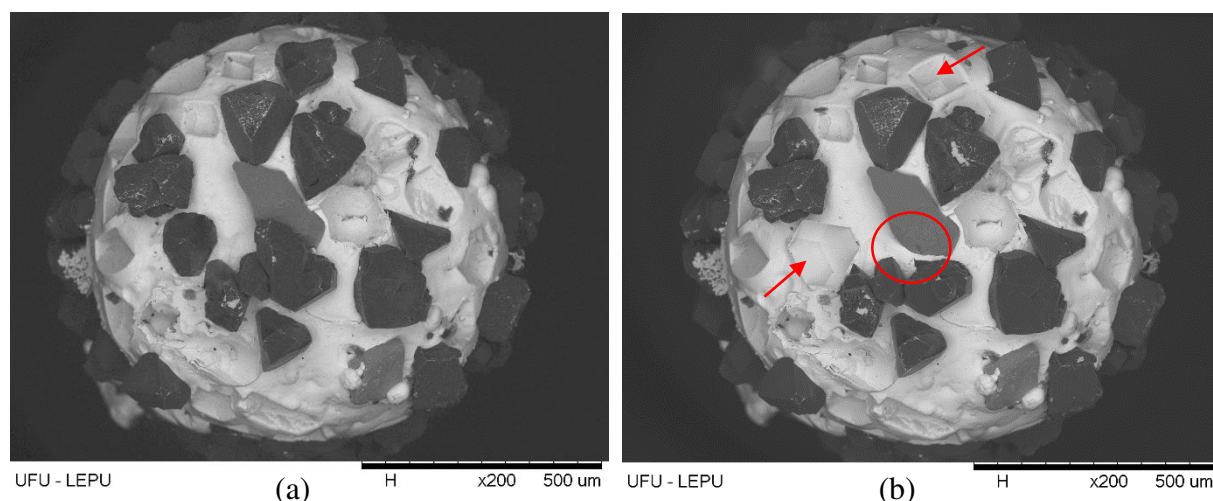


Figura 4.19 - Imagens, em MEV, do microrrebolo na situação (a) antes e em (b) após a microrretificação adotando-se V_s igual a 2,65 m/s, V_w 90 mm/min e a_p 10 μ m.

Ao se analisar qualitativamente o estado da ferramenta foi possível identificar o desprendimento (apontado pelas setas em vermelho) e arrancamento (indicado pelo círculo em vermelho) de partículas abrasivas no topo da ferramenta de corte, possivelmente devido à baixa ancoragem com o ligante. Nota-se que o ligante não envolve mais de 50 % do volume dos abrasivos, resultando em menor capacidade de retenção, o que também pode ter prejudicado a usinagem e ocasionando em acabamento final mais rugoso. Por outro lado, a maior protrusão fornece maior volume entre os abrasivos para transporte de fluido e cavacos.

Quanto aos resultados obtidos para a incerteza expandida durante os experimentos, de modo geral, para os parâmetros Ra e Rq , os valores de incerteza não apresentaram significativas variações em termos absolutos, independentemente da condição de corte selecionada, indicando uma boa homogeneidade das leituras avaliadas, apresentando uma média igual a $0,033 \mu\text{m}$ para Ra e $0,036 \mu\text{m}$ para Rq . Já para os demais parâmetros de rugosidade, não foi possível estimar uma tendência definida de comportamento da grandeza em termos dos parâmetros de corte. Porém, pode-se afirmar que a média das medições foi a grandeza que mais contribuiu para a incerteza final, de modo que quanto maior foi o valor de U calculado, menor foi a repetibilidade das leituras encontradas (maior desvio padrão).

4.3.2 Avaliação estatística

Os quadros de ANOVA, abordando a análise estatística dos ensaios experimentais, os quais consideram 3 fatores como variáveis independentes, sendo eles Vs , ap e Vw , avaliados em três níveis cada, para a obtenção dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rz , Rp , Rv e Rt , são apresentados nas Tabs. 4.1 a 4.6, respectivamente, em que a linha de erro representa a variação dentro das leituras.

Tabela 4.1 - ANOVA para o Ra dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes Vs , ap e Vw .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
Vs	0,178670	1	0,178670	79,69742	0,000000
ap	0,019518	1	0,019518	8,70618	0,004816
Vw	0,132802	1	0,132802	59,23766	0,000000
Erro	0,112092	50	0,002242		

Tabela 4.2 - ANOVA para o Rq dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes Vs , ap e Vw .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
Vs	0,357460	1	0,357460	83,00787	0,000000
ap	0,034837	1	0,034837	8,08969	0,006434
Vw	0,220737	1	0,220737	51,25857	0,000000
Erro	0,215317	50	0,004306		

Tabela 4.3 - ANOVA para o R_z dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
V_s	16,89215	1	16,89215	94,59884	0,000000
a_p	0,34092	1	0,34092	1,90918	0,173197
V_w	5,16565	1	5,16565	28,92849	0,000002
Erro	8,92831	50	0,17857		

Tabela 4.4 - ANOVA para o R_p dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
V_s	9,06464	1	9,064636	77,37775	0,000000
a_p	0,03987	1	0,039867	0,34031	0,562272
V_w	1,68318	1	1,683178	14,36798	0,000406
Erro	5,85739	50	0,117148		

Tabela 4.5 - ANOVA para o R_v dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
V_s	1,208402	1	1,208402	80,27552	0,000000
a_p	0,147671	1	0,147671	9,80996	0,002899
V_w	0,951418	1	0,951418	63,20380	0,000000
Erro	0,752659	50	0,015053		

Tabela 4.6 - ANOVA para o R_t dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V preparadas mecanicamente considerando como variáveis independentes V_s , a_p e V_w .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
V_s	34,54352	1	34,54352	97,09962	0,000000
a_p	0,87535	1	0,87535	2,46055	0,123046
V_w	8,27483	1	8,27483	23,26001	0,000014
Erro	17,78767	50	0,35575		

Por meio dos valores de probabilidade de significância p encontrados, determinou-se, com um nível de confiabilidade de 95 %, que para os parâmetros R_a , R_q e R_v , todos os fatores investigados (velocidade de corte V_s , profundidade de corte a_p e velocidade de avanço V_w) provocaram efeitos estatisticamente significantes nos valores médios resultantes. Para os parâmetros R_z , R_p e R_t , todavia, o fator a_p não provocou efeitos estatisticamente significativos

nos valores médios obtidos, concluindo-se que os resultados das médias das leituras de medição para estes parâmetros não foram suficientes para causarem tais efeitos.

4.4 Processo eletroquímico

Nesta sessão são apresentados os resultados encontrados quanto ao comportamento eletroquímico da liga Ti-6Al-4V e dos ensaios de passivação da superfície das amostras considerando a variação na concentração da solução eletrolítica (testes preliminares) e do tempo de passivação (ensaios finais) para os diferentes valores de tensão elétrica avaliados.

4.4.1 Curva de polarização

O comportamento eletroquímico do material, a liga Ti-6Al-4V, após ensaio de polarização potenciodinâmica, para uma solução eletrolítica de água destilada e NaCl a concentração de 10 %, em temperatura ambiente controlada, é exibido na Fig. 4.19. A curva é definida pela relação entre o potencial (com base no eletrodo de referência SCE), em Volts, no eixo Y, e pela densidade de corrente, em mA/cm², no eixo X.

Conforme explicado por Assis e Costa (2007), pela leitura da curva obtida na Fig. 4.20, identificou-se um potencial de corrosão para o sistema eletrolítico desenvolvido igual a - 0,15 V, a partir do qual observa-se um contínuo aumento nos valores da corrente elétrica (densidade de corrente) até um valor aproximado de 0,30 V. Nesse intervalo, caracteriza-se o desenvolvimento das reações eletroquímicas de oxidação e redução, também conhecida como zona de ativação. A região anterior a este valor se refere à estabilização do sistema em que se predomina a evolução de gás hidrogênio no cátodo, sendo marcada por valores de potencial negativos associados à dissociação dos materiais e a presença de cargas negativas no conjunto.

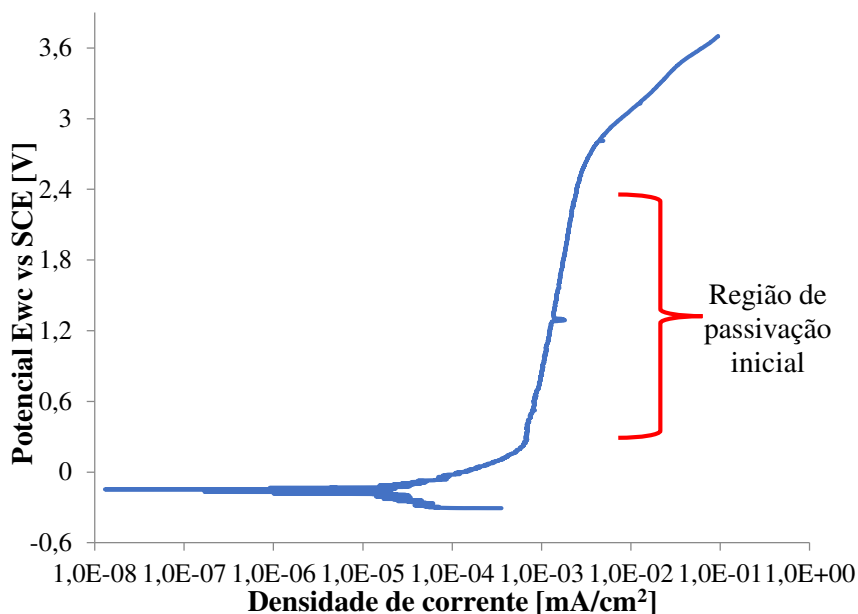


Figura 4.20 - Curva de polarização potenciodinâmica ensaiada em meio 10 % NaCl para a liga Ti-6Al-4V considerando a montagem do sistema eletrolítico desenvolvido.

Com a progressão no aumento dos valores de tensão, verificou-se aproximadamente uma estabilização no valor da densidade de corrente (menor taxa de variação), em que a faixa de crescimento do potencial de 0,30 V até 2,50 V corresponde a uma variação de 0,0015 A/cm². Esse indício é um indicativo da ocorrência de uma fase de passivação do material, caracterizada pela redução na dissociação anódica em resposta à formação de uma camada protetora de óxidos sob a superfície, de menor resistência mecânica que a base metálica e maior resistência elétrica.

Com o desenvolvimento dos valores de tensão a partir de 2,50 V, todavia, um retorno ao crescimento nos valores da densidade de corrente é alcançado, apontando ter se atingido um potencial de quebra no sistema, no qual a camada passivada produzida começa a ser fragmentada, promovendo-se novamente o contato da corrente transportada pelo eletrólito com o metal base, possibilitando uma reativação do mecanismo de eletrólise e corrosão do material.

A integridade superficial da região (a) antes e (b) após (considerando até o valor de potencial máximo igual a 3,6 V seguindo as limitações do potenciostato) o ensaio de obtenção da curva de polarização pode ser visualizada via imagens obtidas em MEV exibidas nas Figs. 4.21a e 4.21b, respectivamente.

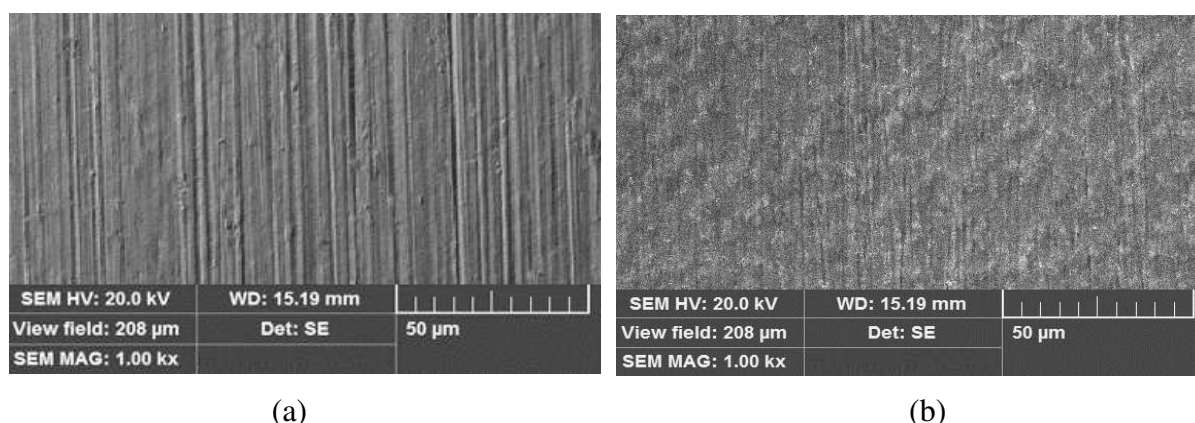


Figura 4.21 - Imagem em MEV da superfície da peça (a) antes e (b) após o ataque eletroquímico para obtenção da curva de polarização potenciodinâmica da liga Ti-6Al-4V.

Pela Figura 4.21, para a ampliação mostrada, verificou-se que a alteração superficial decorrente do ataque eletroquímico, não resultou em cavidades profundas (*pites*) e danos estruturais visíveis ao material. Foi ainda possível observar as marcas de lixamento (realizado como etapa de preparação da superfície), recobertas por uma camada de produtos formada na peça, destacando-se a presença de asperezas e material aderido sob a superfície.

Uma análise via MEV-EDS foi realizada em pontos aleatórios na área atacada, encontrando, em média, uma concentração de 18,2 % de oxigênio. Conforme relatado por Speck e Fraker (1980), em uma continuação do desenvolvimento da curva em maiores valores de tensão, frequentes formações de camadas passivadas superficialmente podem ocorrer em resposta à ocorrência das reações. Para o sistema montado, a adoção de tensões acima de 3,6 V pode convalidar essa hipótese.

4.4.2 Crescimento da camada de passivação - ensaios eletroquímicos preliminares

Primeiramente, justifica-se a escolha de um eletrólito composto por água destilada mais NaCl e não NaNO₃ (que apresenta um caráter passivador) para a realização dos ensaios preliminares e definitivos uma vez que a eletroquímica foi utilizada para promover a formação de uma camada de óxidos sob a superfície da peça. Conforme exposto por Davydov *et al.* (2017), o titânio e suas ligas, ao entrar em contato com o ar atmosférico, naturalmente produz um filme de óxidos composto basicamente de TiO₂, característico desses materiais. Durante a pesquisa, pretendeu-se avaliar condições em valores de tensão reduzidos que se enquadrassem em processos de micro-ECM (< 10 V), de tal modo que o filme de óxidos espontaneamente produzido poderia encobrir o efeito de indução à passivação do metal. Nesse contexto, a

utilização de um eletrólito com íons agressivos (Cl^-) se mostrou oportuna como uma tentativa de equilibrar o efeito natural de passivação da liga (para que atue na quebra dessa específica camada) com a passivação induzida pela fonte de tensão elétrica (de modo que a corrente elétrica transportada atue sobre a superfície do metal-base para a formação de uma camada de óxidos oriunda das reações eletroquímicas de anodização).

Nas imagens em MEV retiradas após os ensaios eletroquímicos para determinação do crescimento da camada de passivação nas amostras de Ti-6Al-4V considerando a variação da concentração da solução eletrolítica em 5 % e 10 % (2 níveis) e da tensão elétrica em 3 níveis (2 V, 4 V, 6 V), a um tempo de passivação único de 1 s, visualizou-se uma seção transversal (ou superfície lateral esquerda) polida e a camada passivada formada na face superior da peça correspondente à parte mais clara (branca) em destaque.

Na Figura 4.22 são representados graficamente os valores médios numéricos correspondentes à medição da espessura das camadas obtidas, e na Fig. 4.23 são apresentadas as imagens obtidas pela microscopia eletrônica que possibilitaram as medições.

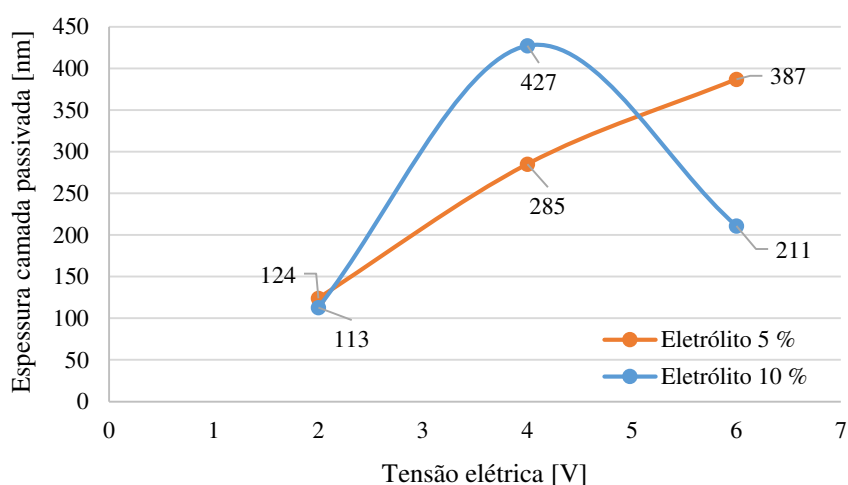
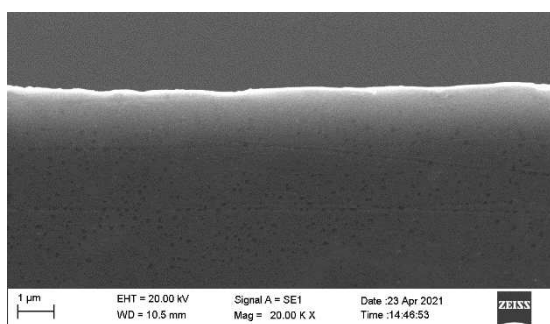
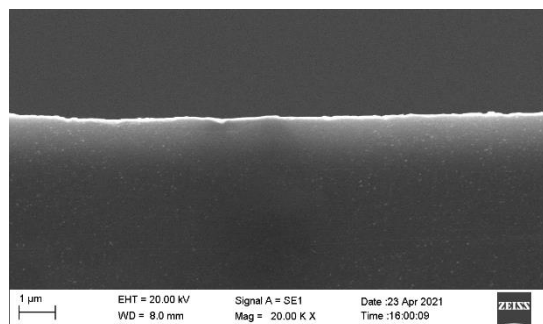


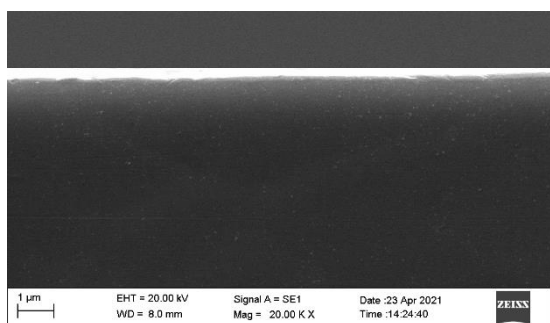
Figura 4.22 - Relação gráfica entre a tensão elétrica, em Volts, e a espessura da camada de passivação resultante, em nm, para um eletrólito com concentrações de 5 % e 10 % de NaCl.



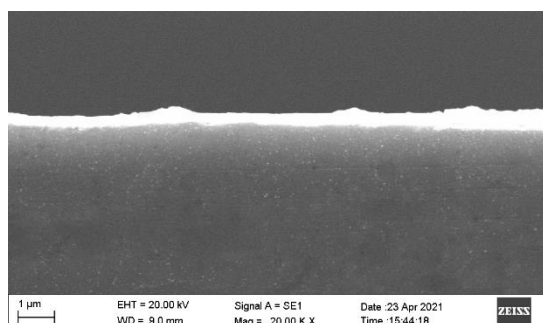
(a) eletrólito 5 %, tensão 2 V



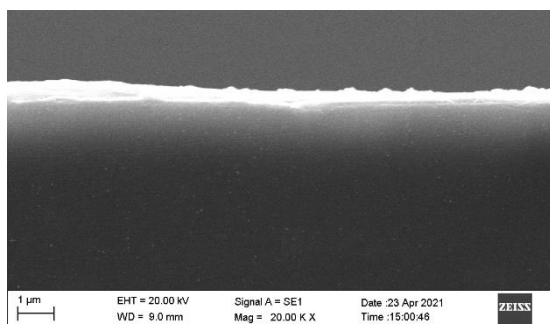
(d) eletrólito 10 %, tensão 2 V



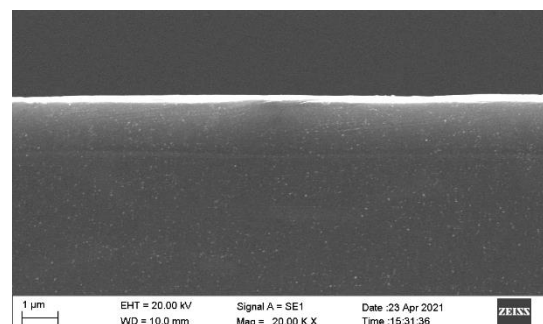
(b) eletrólito 5 %, tensão 4 V



(e) eletrólito 10 %, tensão 4 V



(c) eletrólito 5 %, tensão 6 V



(f) eletrólito 10 %, tensão 6 V

Figura 4.23 - Imagens, em MEV, da seção transversal das peças de Ti-6Al-4V destacando a camada passivada formada sob a face superior em diferentes condições de concentração do eletrólito NaCl (5 % e 10 %) e tensão elétrica (2 V, 4 V e 6 V).

Identificou-se que para uma tensão aplicada de 2 V, as espessuras do filme isolante formado para as concentrações de 5 % e 10 % apresentaram valores semelhantes. Durante os ensaios, nesta tensão elétrica verificou-se que a corrente elétrica se manteve estável e praticamente nula, em que a resolução do equipamento (igual a 1 mA) não foi capaz de medir o valor de corrente formada no sistema elétrico, conforme indicado pelos dados de ensaio apresentados na Fig. 4.24a retirada do programa computacional da fonte elétrica. Com base nos resultados encontrados para a curva de polarização, na tensão de 2 V, o valor da densidade de

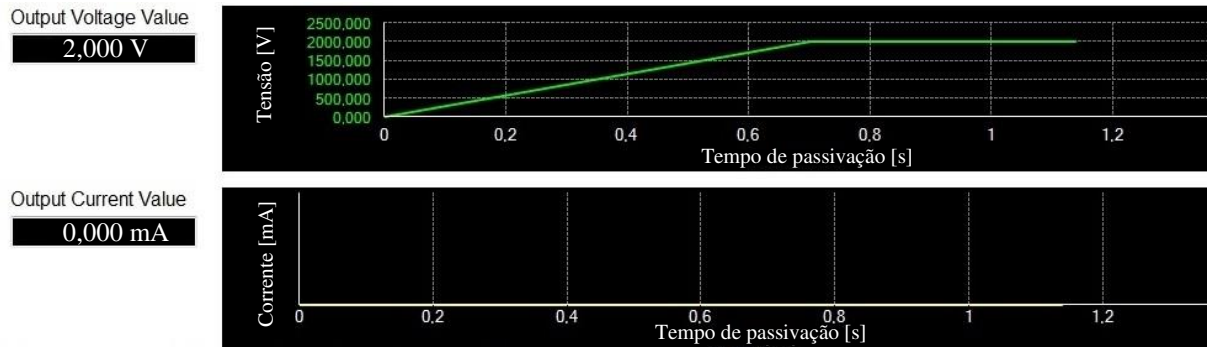
corrente correspondente equivale a $1,9 \cdot 10^{-3}$ mA/cm², assim, a corrente alcançada se encontra próxima de $0,4 \cdot 10^{-3}$ mA, a qual foi considerada para ambas as concentrações avaliadas.

Com o aumento no valor da tensão para 4 V, verificou-se uma intensificação da atividade eletroquímica definida por um expressivo aumento da corrente (e também da densidade de corrente) a 2 mA ($J = 10,0$ mA/cm²), sucedida igualmente para a solução de concentração 5 % e para a 10 %. Na Fig. 4.24b é apresentado este comportamento, válido para ambas as concentrações. Destaca-se que para o eletrólito 10 %, a camada passivada formada atingiu a maior espessura encontrada, igual a 427 nm. Este fato pode estar associado com a maior concentração da solução eletrolítica utilizada, responsável em promover uma maior formação de óxidos, conforme apresentado por Murherjee *et al.* (2007), resultando em maiores espessuras da camada anodizada.

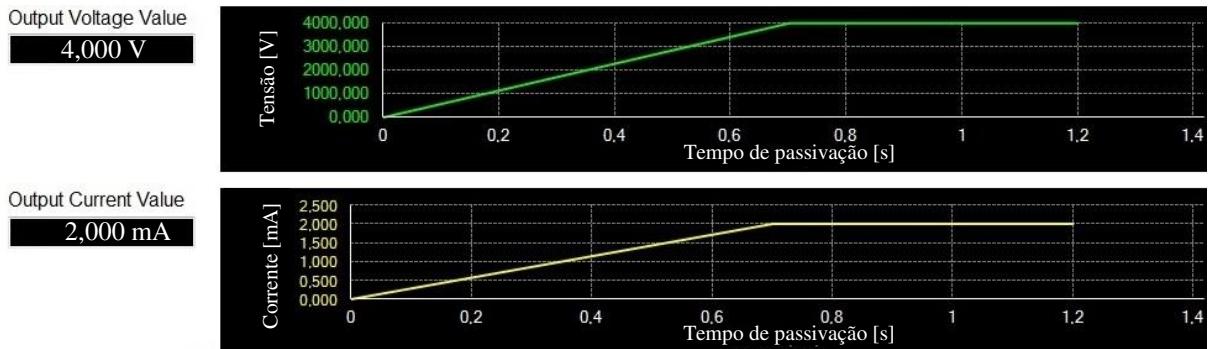
Com a adoção de uma tensão mais elevada, ainda considerando a solução eletrolítica de concentração 10 %, igual a 6 V, todavia, a espessura da camada de passivação produzida foi menos espessa quando comparada à situação em 4 V. O aumento da tensão, neste caso, associado ao conseqüente aumento da corrente em valores ainda maiores, igual a 14 mA ($J = 70$ mA/cm²) como apresentado na Fig. 4.24c, pode ter resultado em uma intensificação da agressividade dos ânions cloreto (Cl⁻) em solução, os quais segundo He *et al.* (2018), apresentam pequenas dimensões e alta adsorção. Em função dessas características, os íons podem ter penetrado nos poros da camada de óxidos formada, promovendo um desmembramento de sua estrutura (porosa e de menor resistência mecânica), resultando em menores espessuras.

Em contrapartida, no eletrólito 5 % NaCl, embora houve também um aumento no valor da corrente elétrica para 9 mA ($J = 45$ mA/cm²) vide Fig. 4.24d, promovido pela adoção de uma maior tensão de 6 V, a menor agressividade da composição não culminou no ataque ao filme produzido. Nesta situação, verificou-se um comportamento passivador do material, induzindo a formação de uma camada de produtos com maior espessura comparativamente a encontrada durante o ensaio com 4 V, em que é possível ainda visualizar graficamente uma tendência à redução da corrente com o tempo de aplicação em virtude da maior espessura produzida.

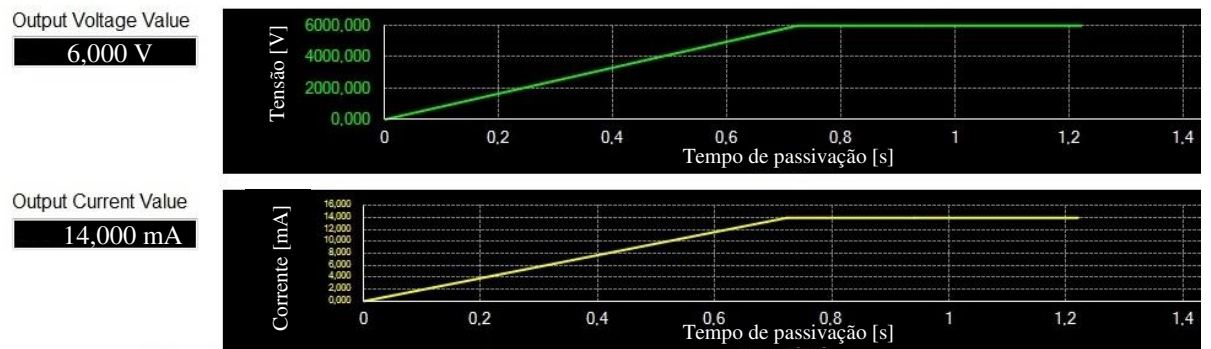
Ressalta-se que, nos gráficos apresentados na Fig. 4.24, apesar da seleção do tempo de 1 s para os ensaios, pelo número ser da mesma ordem de grandeza da resolução do *software*, pequenos atrasos no valor programado eram detectados por erro do equipamento, em que os gráficos apresentados forneciam valores próximos a 1,2 s.



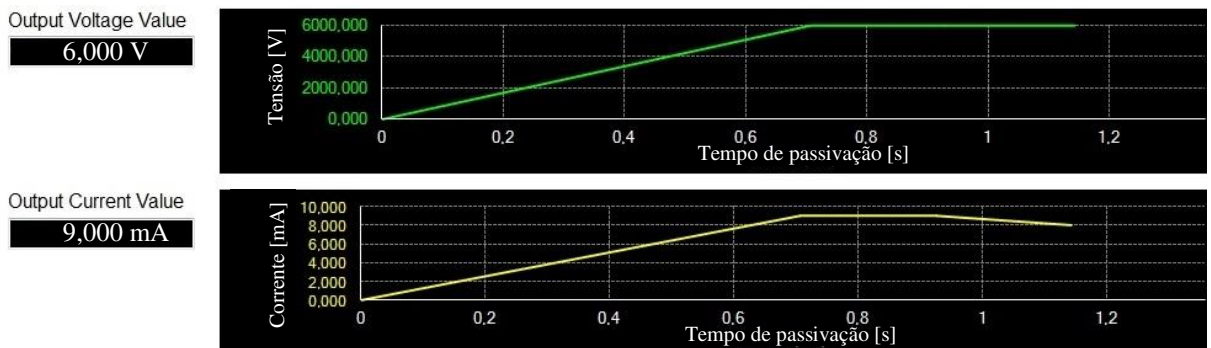
(a)



(b)



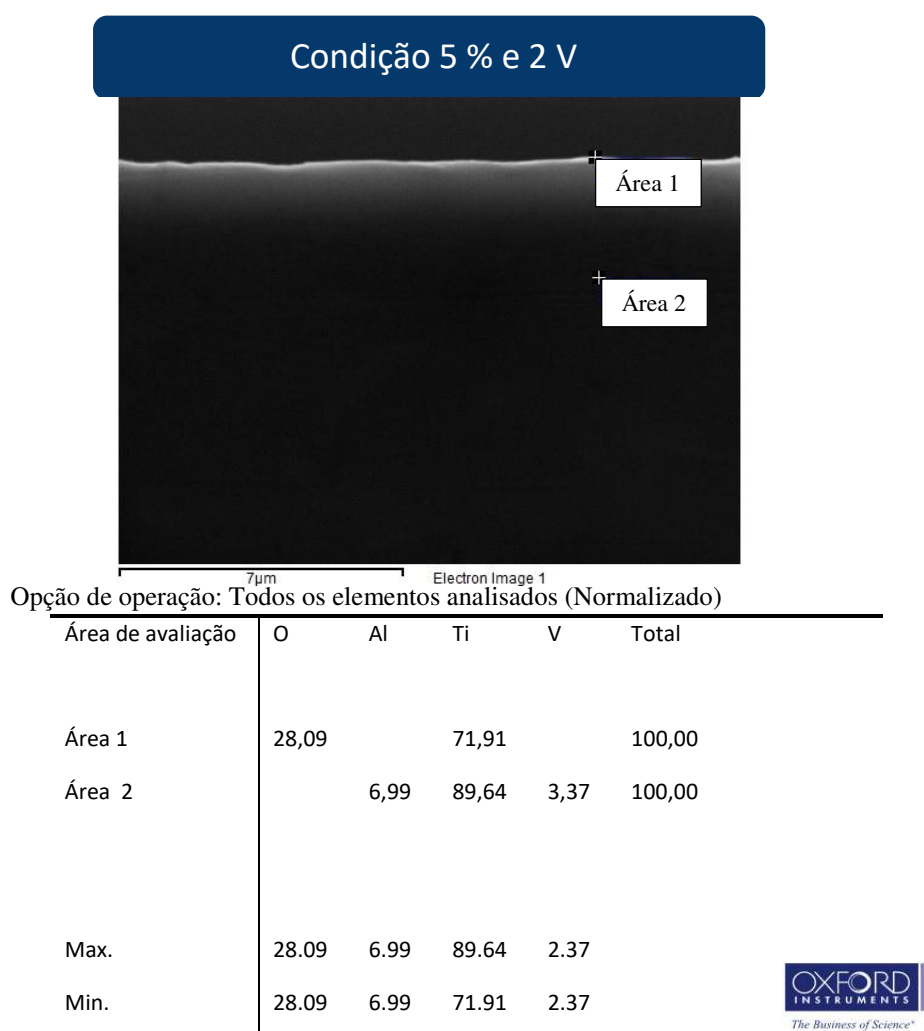
(c)



(d)

Figura 4.24 - Comportamento da tensão e da corrente elétrica no tempo de passivação de 1 s nas condições (a) 2 V (mesmo resultado para NaCl 5 % e NaCl 10 %), (b) 4 V (mesmo resultado para NaCl 5 % e NaCl 10 %), (c) 6 V e concentração 10 % e (d) 6 V e concentração 5 %.

A análise elementar da camada passivada produzida em cada condição basicamente determinou a presença de dois elementos químicos na composição: titânio e oxigênio, balanceados em concentração, em maior ou menor grau dependendo dos parâmetros selecionados. A maior concentração de oxigênio foi encontrada na condição de 2 V e concentração de eletrólito 5 %, sendo igual a 28,09 %, conforme mostrado na Fig. 4.25, que apresenta as informações fornecidas pelo EDS durante a avaliação. Destaca-se que apesar da possibilidade de formação de óxidos adicionais como Al_2O_3 ou derivados do V, relacionados aos demais elementos constituintes da liga Ti-6Al-4V, não foram detectadas tais variações nas camadas produzidas.



Todos os resultados estão em peso%

Figura 4.25 – Concentração pós análise elementar da seção transversal da peça Ti-6Al-4V após ensaio de passivação a uma tensão de 2 V e tempo de passivação 1 s com uma solução eletrolítica de concentração 5 % NaCl.

De modo geral, avaliando os 3 níveis de tensões considerados, a adoção de um eletrólito de menor concentração (5 %) possibilitou a obtenção de uma variação praticamente linear entre o crescimento da camada oxidada e a tensão elétrica, condizente com o obtido por Velten *et al.* (2001), indicando um comportamento passivador do material. Deste modo, tal condição foi selecionada para compor o desenvolvimento dos ensaios híbridos de usinagem. A temperatura da solução durante todos os ensaios foi igual a 30 °C, seguindo as recomendações apresentadas por Klocke *et al.* (2014).

4.4.3 Passivação superficial das amostras - ensaios eletroquímicos definitivos

A etapa eletroquímica para oxidação das superfícies das amostras da liga de titânio considerando o planejamento 3 x 3 entre potencial e tempo de aplicação foi realizada, resultando na formação (visível a olho nu) de camadas de óxidos caracterizadas por apresentarem uma cor amarelada na face superior das amostras. Na Figura 4.26 é mostrado um exemplo em imagem real da superfície tanto em condição inicial (após lixamento) quanto após o ensaio em que foi adotado uma tensão de 6 V e ataque de 10 segundos. Por se tratarem de condições brandas de ataque eletroquímico, as marcas de lixamento da preparação inicial das peças na face superior ainda se apresentavam visíveis mesmo após a passivação do material.

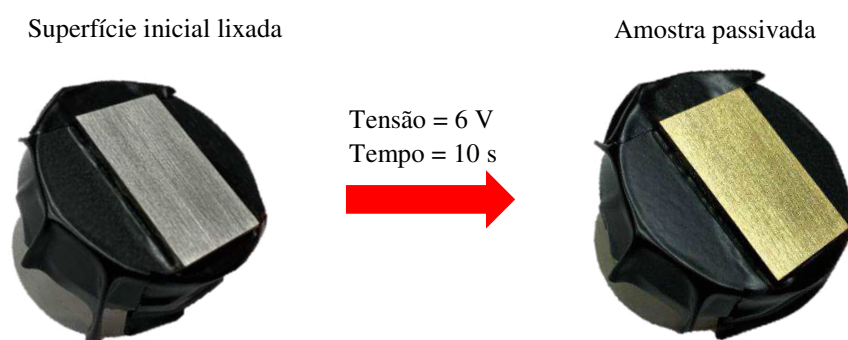


Figura 4.26- Resultado do ensaio de passivação da superfície lixada (#180) da peça Ti-6Al-4V a uma tensão de 6 V e tempo de ataque eletroquímico igual a 10 s.

Na Figura 4.27 são exibidas as imagens obtidas em MEV da seção transversal das amostras após as etapas de lixamento e polimento lateral, possibilitando a visualização da camada de óxidos (região branca em destaque) originada em cada uma das condições investigadas.

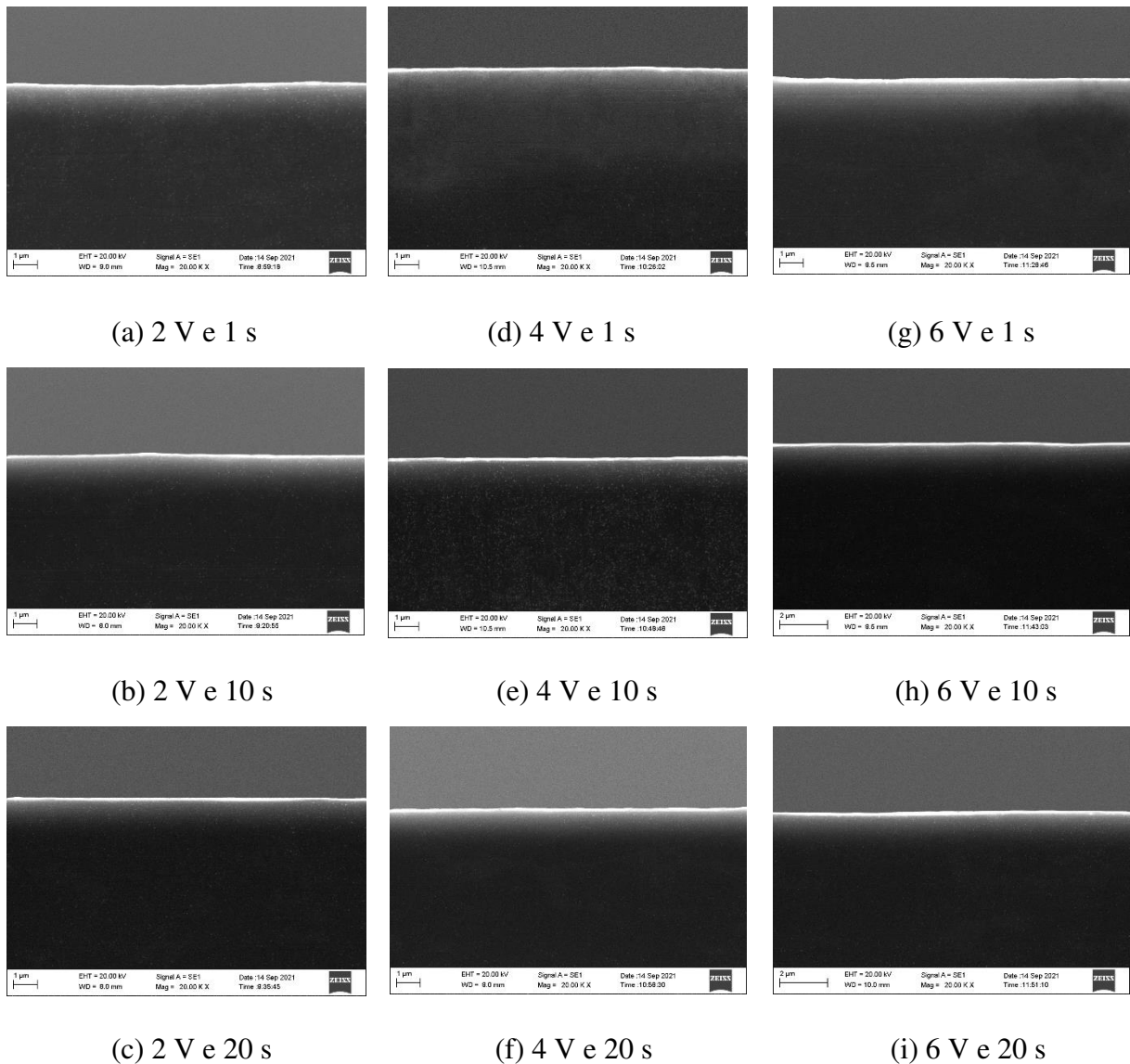


Figura 4.27 - Imagens, em MEV, da seção transversal das peças de Ti-6Al-4V, em diferentes condições de passivação, em que a parte branca em destaque representa a camada passivada formada sob a face superior.

Conforme abordado em Qu *et al.* (2013), Li *et al.* (2016) e Tak e Mote (2021), as camadas passivadas são oriundas da formação de corrente elétrica fornecida pela fonte de tensão na área de corte, induzida pela proximidade com o cátodo, que promove a liberação de elétrons do material, produzindo íons em solução. Assim como o material, a molécula de água e o sal em solução também se dissociam. Na interface ânodo/eletrólito, região de interesse relativa à preparação da superfície da peça, os íons de titânio (geralmente Ti^{2+}) se unem ao ânion hidroxila (OH^-), formando TiO^{2+} e H^+ em suspensão. A parcela de H^+ , por afinidade eletrônica, se direciona ao cátodo para adquirir elétrons e formar gás hidrogênio. Os íons TiO^{2+} , por sua vez,

buscando estabilidade, se unem novamente aos íons hidroxilas suspensos, produzindo TiO_2 e liberando novas moléculas de água, de modo a completar o balanço energético eletroquímico. Os átomos de TiO_2 se aderem à superfície metálica da peça como um filme protetor do metal base, aumentando a resistência elétrica.

Assim, por meio de análise em EDS, constatou-se a presença de titânio e oxigênio como elementos constituintes das camadas originadas, em concentrações balanceadas, titânio em maior grau (82 % ~ 95 %) e oxigênio em menor grau (5 % ~ 18 %). Com o ImageJ, quantificou-se as espessuras das camadas de passivação produzidas, cujos resultados são apresentados graficamente na Fig. 4.28.

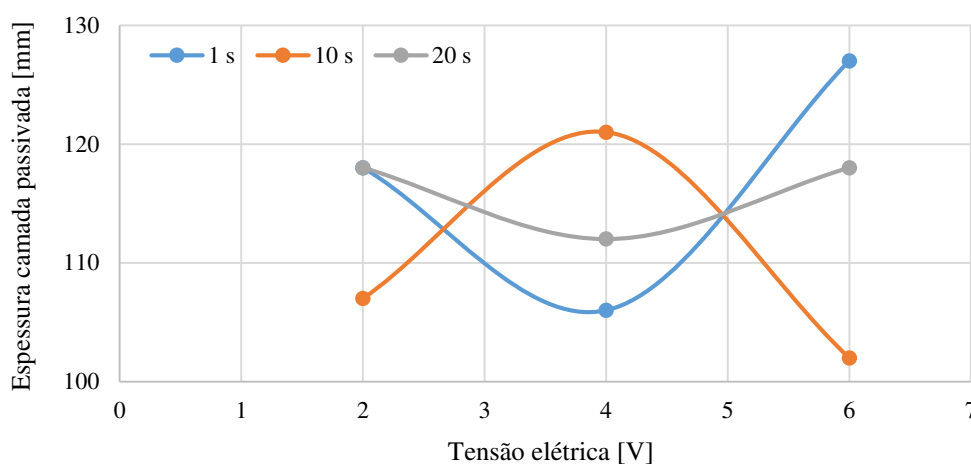
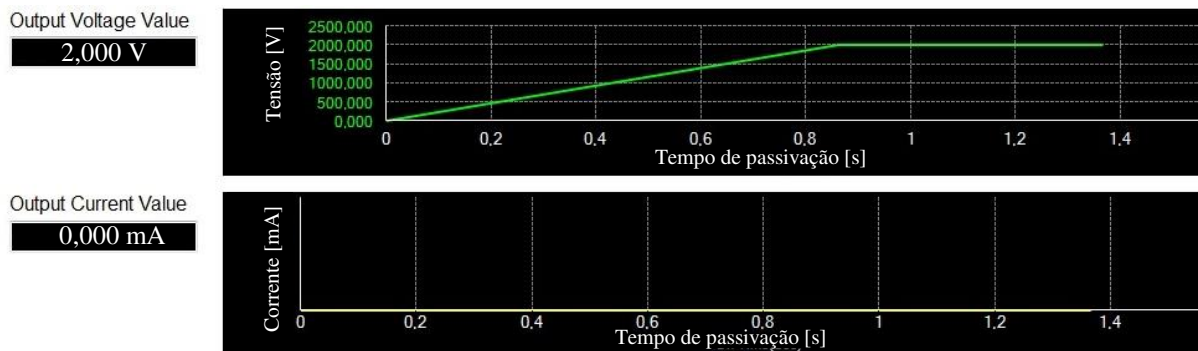


Figura 4.28 - Relação gráfica entre tensão elétrica, em Volts, e espessura da camada passivada resultante, em nm, para diferentes tempos passivação da liga Ti-6Al-4V em uma solução eletrolítica 5 % NaCl.

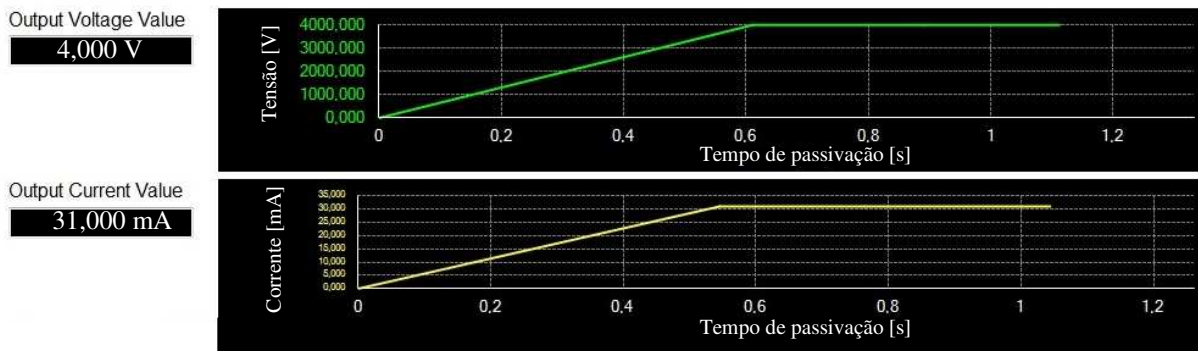
Verificou-se que para o sistema eletroquímico montado, a espessura do filme de óxidos formado foi semelhante em todos os casos investigados, com valores resultantes na faixa de 0,102 mm a 0,127 mm. As espessuras encontradas foram inclusive menores aos ensaios preliminares considerando a concentração de 5 % e tempo de passivação 1 segundo, em que foram obtidas espessuras de 124 nm, 285 nm e 387 nm para as tensões de 2 V, 4 V e 6 V, respectivamente, em contrapartida aos valores de 118 nm, 110 nm e 127 nm apresentados na Fig. 4.28 para as mesmas condições de ensaio.

Essa redução nos valores de espessura encontrados pode estar relacionada com a maior área exposta da face superior da peça considerada para os ensaios definitivos, uma vez que em função da realização posterior de ensaios de microrretificação sob a superfície passivada,

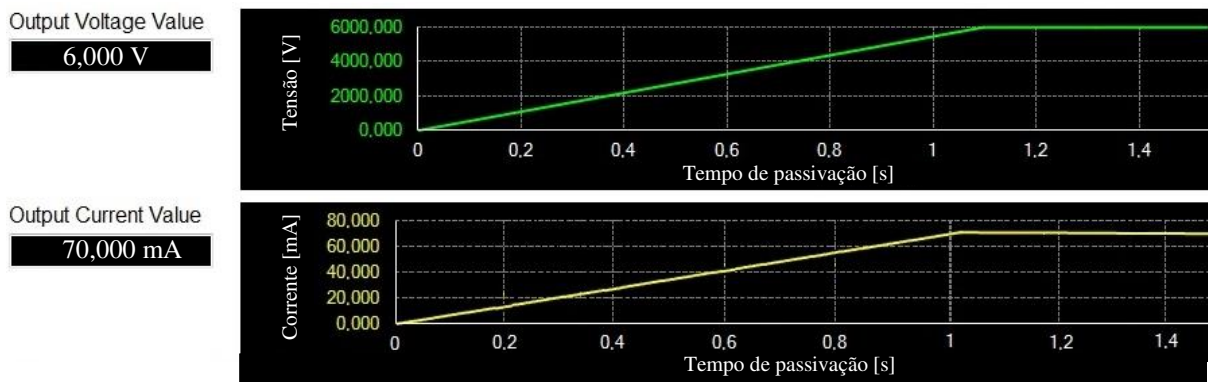
considerou-se o ataque em toda a face superior das amostras. Devido à não utilização de máscaras de isolamento elétrico nas demais superfícies da peça, além da área superior, as laterais também foram consideradas para cálculo da densidade de corrente visto a oxidação sofrida nessas regiões. Na Fig. 4.29 são exibidos os gráficos do desempenho da tensão e da corrente obtidos nos testes para passivação do material em que se adotou um tempo de passivação igual a 1 s para os valores de 2 V, 4 V e 6 V.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.29 - Variação da tensão e da corrente elétrica a um tempo de passivação da liga Ti-6Al-4V de 1 segundo nas tensões (a) 2 V, (b) 4 V e (c) 6 V.

Conforme mostrado na Figura 4.29, os mesmos erros de apresentação do tempo de passivação do *software* continuaram. Ressalta-se que o tempo ajustado de ensaio foi igual a 1 s. Para a tensão de 2 V, o mesmo comportamento gráfico foi observado quanto aos ensaios preliminares, relacionado à limitação de resolução da fonte elétrica. Com base na curva de polarização, admitiu-se nesta condição uma densidade de corrente (J) correspondente a $1,9 \cdot 10^{-3}$ mA/cm², uma vez que os valores de espessura da camada passivada obtidos foram similares (118 nm comparado a 124 nm no ensaio preliminar) possibilitando tal consideração, sendo encontrado como valor aproximado correspondente à corrente elétrica $9,0 \cdot 10^{-3}$ mA.

Para as tensões de 4 V e 6 V, entretanto, apesar de terem sido obtidos também maiores valores numéricos de corrente elétrica conforme apresentado graficamente, a densidade de corrente desenvolvida para cada condição foi menor (maior área usinada), em que foram encontrados valores aproximados de 6,5 mA/cm² e 15 mA/cm², respectivamente, em contrapartida aos obtidos anteriormente de 10 mA/cm² e 45 mA/cm² para as mesmas tensões investigadas.

Tal redução implica em um declínio da atividade eletroquímica local, em que o desenvolvimento das reações para passivação do material é atenuado, ocasionando deste modo a obtenção de menores valores de espessura da camada de óxidos. Com o aumento do tempo de passivação para 10 segundos e 20 segundos, os valores de corrente elétrica não sofreram variação expressiva, se mantendo com o mesmo comportamento para a tensão de 2 V, e variando entre 30 mA e 73 mA para as tensões de 4 V e 6 V, respectivamente, resultando em densidades de corrente semelhantes. Como consequência, as espessuras dos filmes de passivação para as condições apresentadas foram parecidas. Assim pode-se inferir que o aumento da tensão e/ou do tempo de passivação, para o planejamento experimental adotado, não foi capaz de provocar mudanças expressivas no crescimento da camada passivada.

Outro fator que também pode ter influenciado a obtenção de menores espessuras está relacionado com a utilização de um maior *gap* entre ferramenta e amostra, igual a 1,00 mm em contrapartida aos 0,25 mm utilizados nos ensaios preliminares, o qual foi necessário para que a montagem do sistema eletroquímico considerando a passivação de toda a face da peça fosse realizada. Com o aumento no valor do *gap* há uma diminuição na densidade de corrente no eletrólito por maior resistividade elétrica do sistema eletroquímico, resultando em atenuação no desenvolvimento da dissociação anódica e consequentemente na passivação do material.

Após a passivação das amostras, nelas foram usinados microcanais por meio de novos ensaios de microrretificação realizados na minimáquina, possibilitando averiguar a influência, em termos microestruturais e de acabamento superficial resultante, quanto a modificação prévia de uma superfície por passivação antes de ser submetida ao ensaio mecânico (microrretificação assistida por eletroquímica). Por associar processos eletroquímicos e mecânicos, a técnica foi conceituada como híbrida.

4.5 A inventividade do Projeto de Pesquisa

Atualmente, no âmbito da usinagem com foco na área híbrida de fabricação entre mecânica e eletroquímica, associa-se os graus de liberdade e cinemática de processo de uma ferramenta mecânica de corte (de geometria definida ou não) que atua conjuntamente com o processo eletroquímico, este também como mecanismo de remoção (considerado o maior responsável). Como processos que se enquadram neste propósito se encontram a ECG (retificação eletroquímica) e micro-ECG. A taxa global de remoção de material é aumentada uma vez que a ferramenta de corte atua juntamente com a remoção eletroquímica.

A indução para a formação de uma camada externa de óxidos sob o material (condição de passivação e não de corrosão) da peça, todavia, não é abordada efetivamente como razão principal durante o processo híbrido ECG. O que é encontrado abrange a formação de uma camada passivada sob específicas condições como consequência do acúmulo de produtos das reações eletroquímicas que se aderem na superfície da peça, isolando eletricamente a mesma, em que o objetivo dos processos híbridos majoritariamente envolve a sua remoção para exposição da base metálica recoberta, tendo a eletroquímica atuante para usinagem de material, sendo a maior contribuinte.

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi de trabalhar em faixas de valores de tensão elétrica nas quais fosse de fato promovida a passivação do material para a formação de uma camada de menor resistência mecânica e dureza do que o material base superficial, tendo a eletroquímica não direcionada mais à remoção de material e sim como agente modificador da superfície (passivador). Objetivou-se averiguar, deste modo, se tal ação poderia beneficiar quanto à qualidade do acabamento pós-usinagem mecânica em amostras do material Ti-6Al-4V (material de difícil usinagem). A ferramenta de corte atuaria, assim, na camada intencionalmente produzida, a qual por apresentar menores forças de ligações químicas com o material base, é mais facilmente usinada, removendo o excesso de irregularidades e/ou material

incrustado sem introduzir danos microestruturais críticos à peça, obtendo superfícies menos rugosas, com melhor acabamento e eliminação de danos críticos. A associação dos processos de eletroquímica como passivador superficial e mecânica de microrretificação configuram o hibridismo da técnica.

Por meio da técnica proposta, os valores de tensão elétrica utilizados puderam ser estimados com base no estudo eletroquímico do metal investigado pelo ensaio da curva de polarização, no qual foi possível prever o comportamento da usinagem no meio eletrolítico abordado. A remoção de material, realizada exclusivamente de forma mecânica, se concentrou a atuar sob a camada passivada/oxidada, de modo que a dureza da ferramenta de corte deve assim ser superior à da camada passivada, sem necessariamente ser superior à dureza do material base.

Considerando os parâmetros de corte empregados e dados obtidos durante a microrretificação de amostras preparadas mecanicamente e nos valores de espessura das camadas de passivação obtidos, objetivando a comparação dos resultados entre superfícies preparadas mecanicamente (lixamento) e superfícies passivadas, nos ensaios realizados neste trabalho a microrretificação também removeu material do substrato das peças e a técnica se mostrou bem-sucedida também.

Em resumo, os ensaios híbridos consideraram como parâmetros fixos os valores de V_w (30 mm/min) e a_p (5 μm) em que foram obtidos o menor Ra durante os ensaios em superfícies não passivadas. A velocidade de corte V_s foi mantida variável por ter apresentado a maior influência segundo ANOVA, uma vez que para todos os parâmetros de rugosidade investigados, apresentou o maior F -valor, indicando uma maior significância do p -valor. Ainda, foram fabricados microcanais com profundidade de corte variável, em que foi produzido um desnivelamento da peça (+ 5 μm), objetivando identificar a influência da profundidade de corte no mecanismo de remoção, formação de rebarbas e acabamento, procedimento este similar ao aplicado na análise de mecanismos de transição dúctil-frágil em materiais de difícil usinagem, como no estudo de Li *et al.* (1999) quanto à microrretificação em vidro óptico.

A tecnologia pretendida é capaz de atuar para a fabricação de componentes de materiais condutores de eletricidade com possíveis aplicações em setores industriais de micro e nano dispositivos eletromecânicos, aeronáutico, aeroespacial, automotivo, bombeamento e envase de fluidos, eletrônico, componentes miniaturizados, instrumentais cirúrgicos e de sistemas de medição, visando a área de usinagem de precisão e ultraprecisão.

4.6 Avaliação quantitativa e qualitativa dos canais microrretificados ao se considerar as superfícies preparadas eletroquimicamente

A análise foi dividida em duas partes: para os canais fabricados a um a_p constante igual a 5 μm , e para os canais fabricados após um desnivelamento da amostra de +5 μm , resultando em um a_p variável e crescente no percurso de corte definido (comprimento do canal).

4.6.1 Canais usinados com a_p constante

Os valores encontrados para os parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_z , R_p , R_v e R_t nos canais fabricados são exibidos nas Figs. 4.30 a 4.35, respectivamente, em que as barras de erros representam os valores de incerteza expandida (95 %) associados à medição. Os gráficos foram divididos de acordo com as condições eletroquímicas adotadas, que consideraram tensões iguais a 2 V, 4 V e 6 V, em tempos de aplicações distintos de 1 s, 10 s e 20 s. Foram ainda agrupados os canais fabricados a V_s de 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, de modo a facilitar a identificação no comportamento dos parâmetros de rugosidade ao longo do tempo.

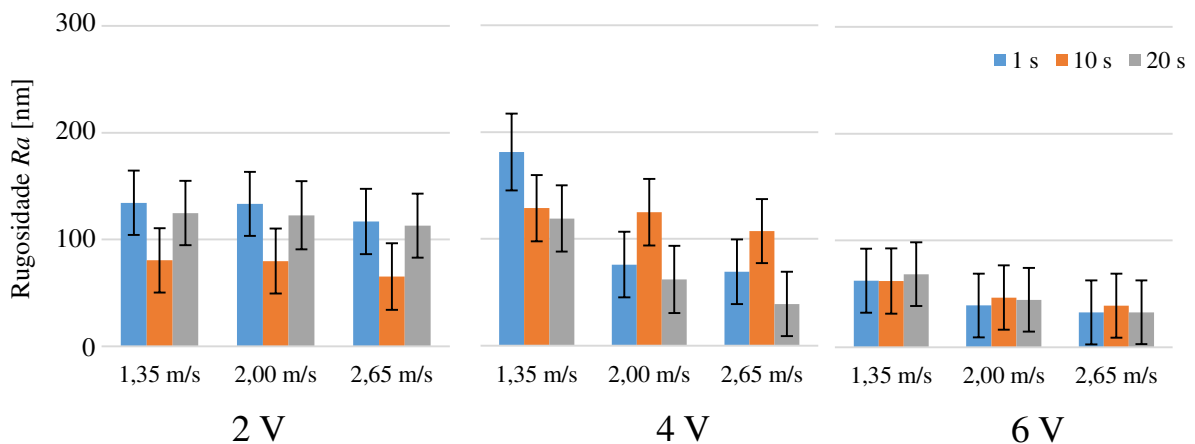


Figura 4.30 - Rugosidade superficial R_a nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem.

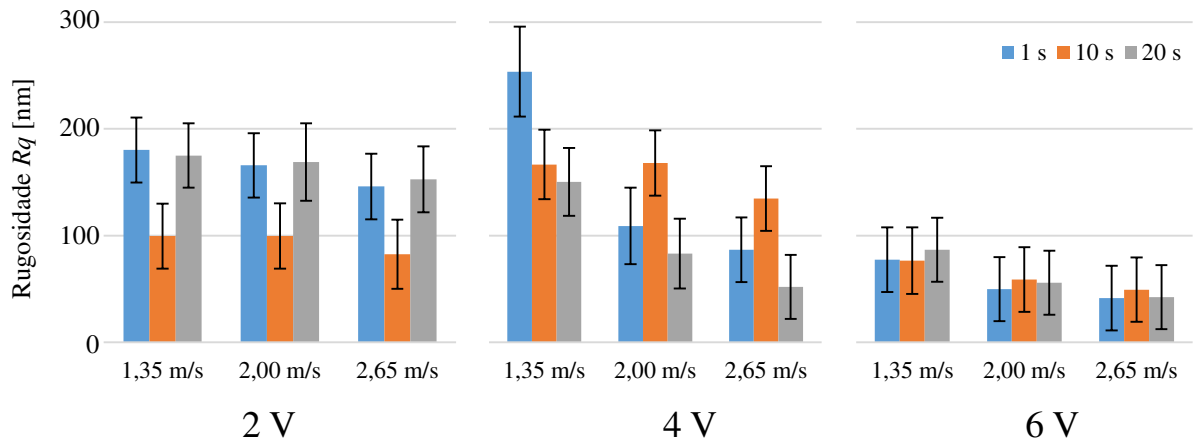


Figura 4.31 - Rugosidade superficial R_q nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem.

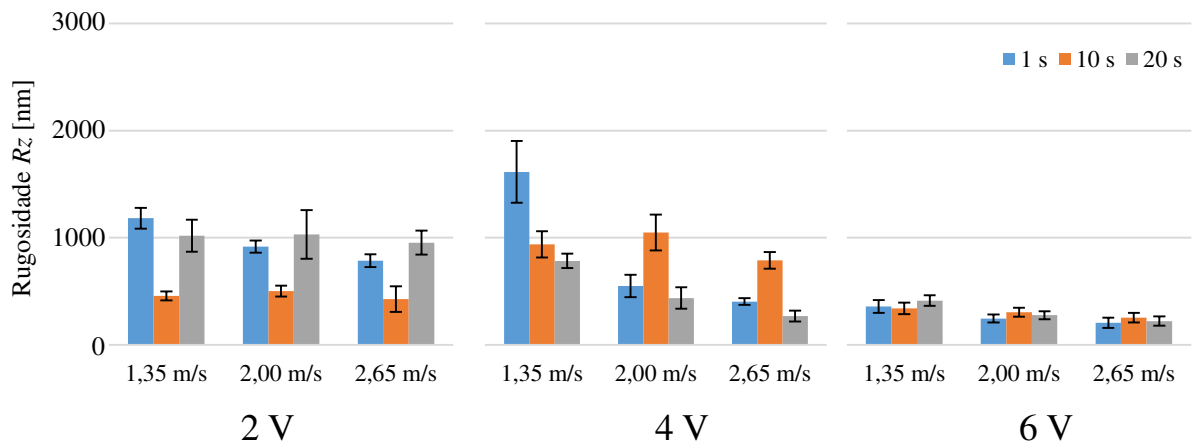


Figura 4.32 - Rugosidade superficial R_z nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem.

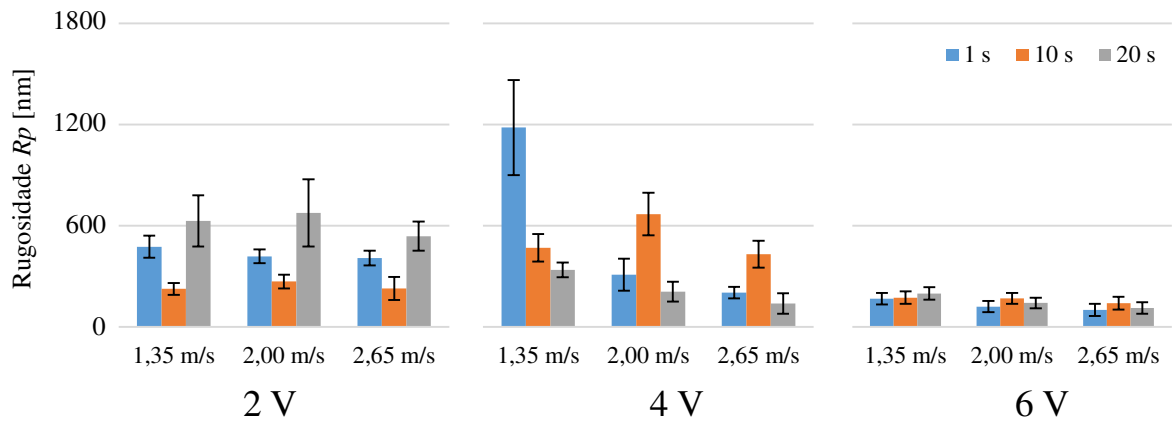


Figura 4.33 - Rugosidade superficial R_p nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem.

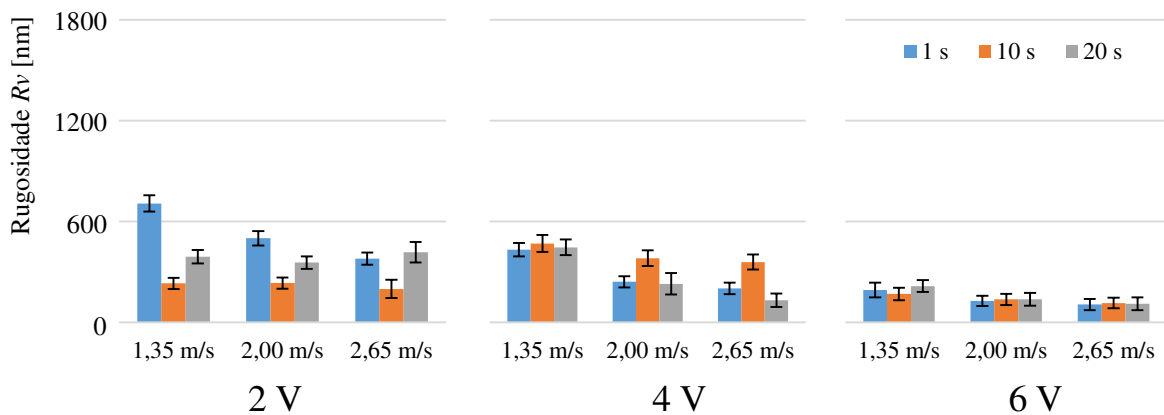


Figura 4.34 - Rugosidade superficial R_v nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem.

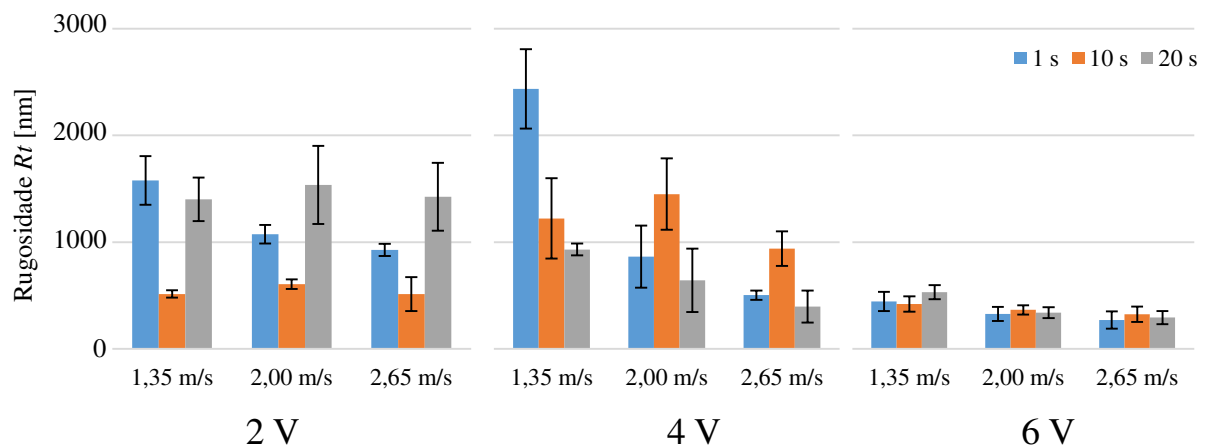


Figura 4.35 - Rugosidade superficial R_t nos canais microrretificados em peças passivadas de Ti-6Al-4V preparadas eletroquimicamente com diferentes parâmetros de usinagem.

Destaca-se que apesar de a_p adotada ser de ordem de grandeza significativamente maior do que a espessura das camadas de passivação produzidas (valor médio $0,114 \mu\text{m}$), usando simultaneamente material base da peça, os resultados encontrados comprovaram a influência benéfica, em termos do acabamento superficial resultante, de uma preparação eletroquímica da superfície metálica da liga antes de ser submetida à microrretificação. Foi observada diminuição no valor médio para todos os parâmetros de rugosidade analisados.

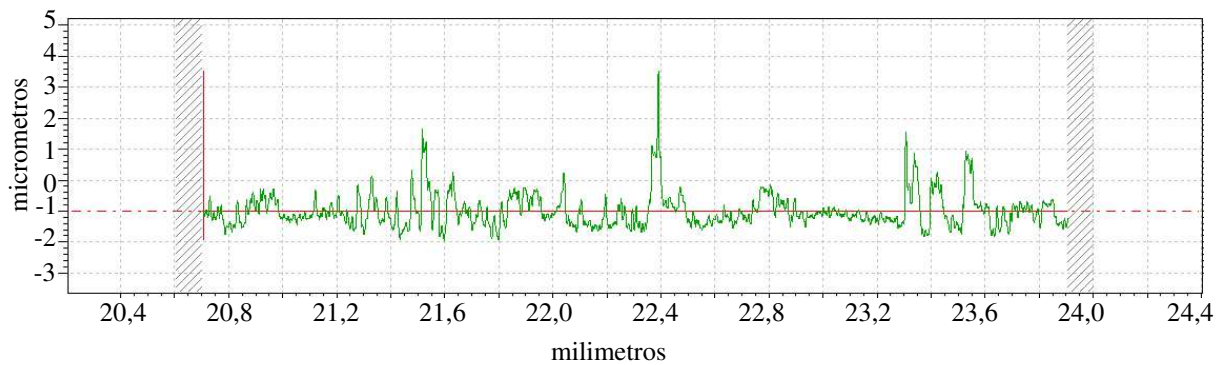
Em módulo, o melhor acabamento superficial R_a foi obtido em duas situações, ambas ao se usinar com uma V_s de 2,65 m/s (60 000 rpm): a primeira em uma superfície passivada a uma tensão de 6 V e tempo de aplicação de 1 s (peça 7), e a segunda a uma tensão de 6 V e tempo de 20 s (peça 9), sendo igual a $33 \pm 30 \text{ nm}$. Considerando os resultados não arredondados de

incerteza expandida, todavia, encontrou-se 30,01 nm e 29,89 nm, respectivamente. Deste modo, selecionou-se a condição de passivação de 6 V e tempo de aplicação de 20 s como a que foi encontrada o melhor acabamento por fornecer uma maior confiabilidade do resultado.

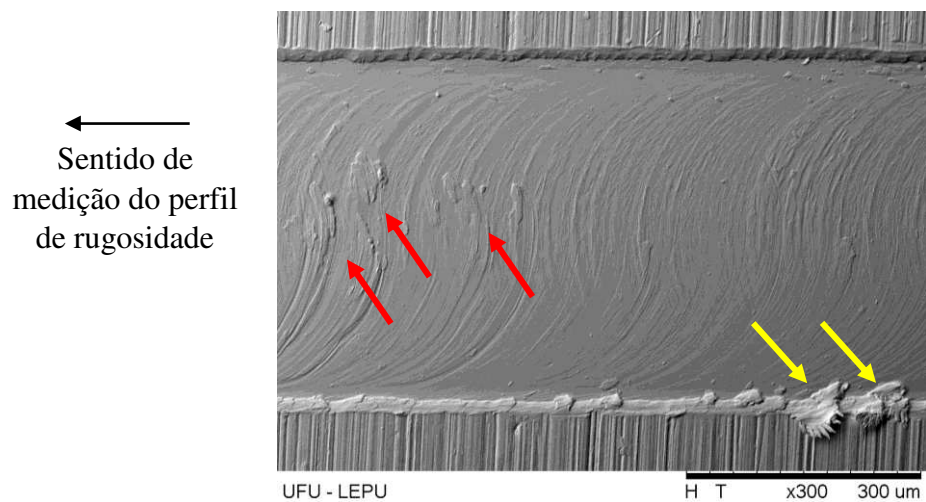
Ao considerar os demais valores de incerteza expandida, de modo geral, foram obtidos resultados semelhantes considerando as grandezas de influência adotadas para o cálculo da variável, em que para Ra e Rq , por exemplo, foram encontrados valores de incerteza na mesma ordem de grandeza do parâmetro de rugosidade. Os maiores resultados obtidos ocorreram para as condições que apresentaram os maiores desvios padrão (menor precisão).

Verificou-se para Ra e Rq também que, independentemente do tempo de ataque para a tensão de 6 V, os resultados em cada Vs investigada apresentaram pequena variação média, indicando uma boa precisão das leituras obtidas, de modo que a adoção de um maior valor de tensão durante a preparação das superfícies se mostrou benéfico à fabricação posterior dos microcanais por microrretificação. Embora a presente pesquisa não tenha utilizado a eletroquímica como processo de usinagem, de acordo com Kumar *et al.* (2018), a adoção de maiores tensões durante a usinagem eletroquímica de materiais condutores de eletricidade favorece a obtenção de acabamentos menos rugosos em função da intensificação das reações de eletrólise e a obtenção de maiores densidades de corrente, o que pode ter influenciado durante a preparação da superfície, refletindo na fabricação dos canais microrretificados.

No microcanal fabricado a uma Vs de 1,35 m/s (30 000 rpm) microrretificado na superfície passivada a uma tensão de 4 V com um tempo de 1 s, notou-se um elevado valor de Rp (igual a $1\,182 \pm 282$ nm), comparativamente os demais resultados, diretamente relacionado aos valores de Rz e Rt , e também influente aos parâmetros de rugosidade média das coordenadas, que apresentaram os maiores resultados dentre todos os ensaios. Na Figura 4.36a e 4.36b são apresentados o perfil de rugosidade, e uma imagem, em MEV, do canal usinado, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4.36 – Em (a) perfil de rugosidade e em (b) imagem superficial, em MEV, do canal microrretificado com V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p 5 μm , em uma superfície passivada à tensão de 4 V e tempo de 1 s.

Por meio das informações fornecidas na Fig. 4.36b, verificou-se a presença de material da peça aderido no fundo do canal (indicado pelas setas em vermelho), detectados pela trajetória de deslocamento da ponta do apalpador ao longo da varredura de medição, justificando a maior presença de picos no perfil da superfície. Além disso, podem ser visualizadas também pequenas formações de rebarbas na borda inferior (indicadas pelas setas em amarelo). Tais indicativos podem ser consequência da utilização de uma menor V_s do microrrebolo, a qual durante os ensaios em superfícies preparadas mecanicamente, demonstrou menor eficiência de remoção de material, em que o acabamento foi comprometido.

Quanto ao tempo de ensaio, não foi possível definir uma tendência de comportamento que possibilitasse estabelecer uma relação de proporcionalidade entre a duração de aplicação

da tensão elétrica durante a passivação e o crescimento ou queda nos valores médios dos parâmetros de rugosidade analisados.

Analisando ainda os parâmetros de forma Rsk e Rku considerando os canais usinados com profundidade de corte constante nas nove superfícies passivadas a diferentes tensões e tempos de ataque, percebeu-se que os valores encontrados, em média, variaram em torno de 1,932 para o primeiro, e 6,601 para o segundo, indicando de fato a maior presença de picos acentuados nos perfis de rugosidade obtidos, conforme pode ser visto na Fig. 4.36a.

Em relação ao Rv , não foram identificadas mudanças expressivas no valor do parâmetro.

Outro aspecto positivo inferido durante a usinagem em superfícies previamente passivadas está relacionado com a ferramenta de corte miniaturizada, em que com um mesmo microrrebolo foi possível realizar diferentes ensaios. Na Figura 4.37 são apresentadas imagens de MEV do microrrebolo utilizado após a usinagem completa dos microcanais planejados para as peças passivadas a uma mesma tensão de 6 V e tempos de (a) 1 s, (b) 10 s e (c) 20 s, adotando V_w 30 mm/min, V_s 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s e as condições de a_p 5 μ m e a_p variável.

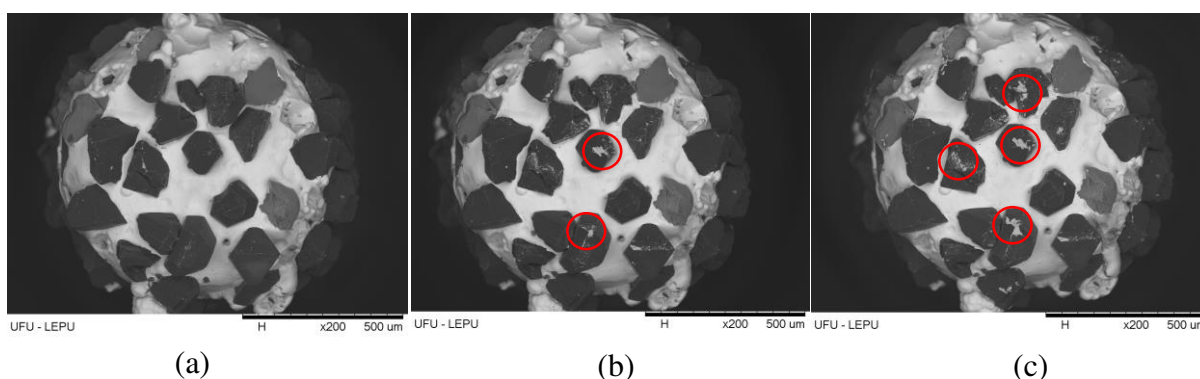


Figura 4.37 – Imagens, em MEV, do microrrebolo após a usinagem mecânica em superfícies passivadas a uma tensão de 6 V e diferentes tempos de passivação (a) 1 s, (b) 10 s e (c) 20 s, para um V_w de 30 mm/min, V_s de 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, e a_p 5 μ m e a_p variável.

Por meio análise das figuras do microrrebolo, nota-se que a integridade superficial do mesmo se manteve praticamente inalterada mesmo após a usinagem de dezoito canais a diferentes velocidades de corte, sem indicar sinais de desprendimento ou fratura das partículas abrasivas. Percebe-se a adesão de material da peça em algumas regiões (como as circuladas em vermelho), mas que não foi capaz de provocar empastamento ou entupimento dos abrasivos protuberantes e prejudicar o corte. Notou-se que a agressividade do rebolo foi mantida. A usinagem transcorreu de forma homogênea e sem danos críticos à microferramenta. Não foi

necessário avivar o microrrebolo, ao contrário dos ensaios de microrretificação das peças apenas preparadas por lixamento.

Em suma, na Figura 4.38, são apresentados os valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos no canal microrretificado considerando a situação em que foi encontrado o menor valor médio de Ra em uma peça preparada mecanicamente comparativamente à respectiva condição de microrretificação em uma superfície passivada eletroquimicamente (tensão elétrica igual a 6 V e tempo de passivação 20 s), possibilitando uma melhor visualização da influência da operação prévia de passivação. Ambas foram realizadas considerando os valores dos parâmetros de corte V_w 30 mm/min, a_p 5 μ m e V_s 2,65 m/s (equivalente a uma rotação igual a 60 000 rpm). As barras de erros correspondem aos valores de incerteza expandida (abrangência de 95 %) associados à medição.

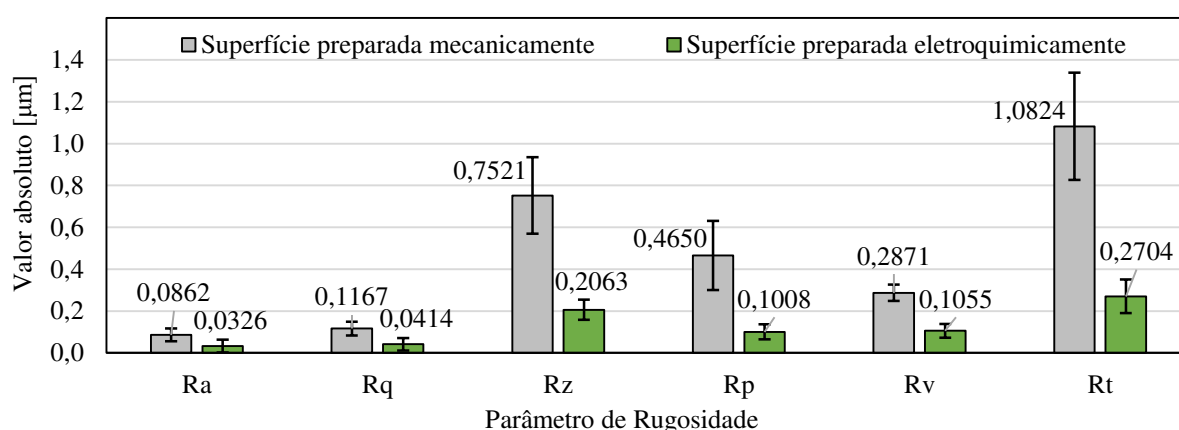


Figura 4.38 – Comparação entre os valores de rugosidade para as respectivas condições que forneceram o menor Ra (ambas usinadas com $V_w = 30$ mm/min, $a_p = 5$ μ m e $V_s = 2,65$ m/s) em superfícies preparadas mecanicamente (lixamento #180) versus eletroquimicamente (tensão elétrica de 6 V e tempo de 20 s).

Relativamente ao Ra , a redução em valor médio ao considerar o resultado encontrado nas peças submetidas à passivação antes de serem microrretificadas é aproximadamente de 62 %. Para os demais parâmetros de rugosidade, Rq , Rz , Rp , Rv e Rt , tais porcentagens equivalem a 64 %, 72 %, 78 %, 63 % e 75 %, respectivamente. Na Figura 4.39 são mostradas as imagens, em MEV, lado a lado dos canais usinados em questão.

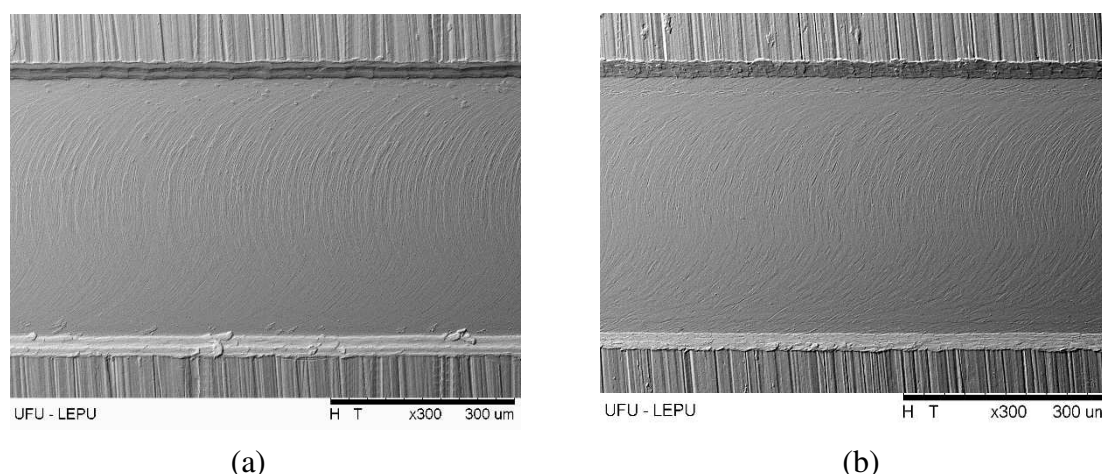


Figura 4.39 – Imagem, em MEV, dos canais microrretificados em uma superfície (a) preparada mecanicamente (lixamento #180) e em (b) preparada eletroquimicamente (lixamento #180 seguido de passivação a tensão de 6 V e tempo de 20 s), na condição em que foi obtido o menor valor de rugosidade Ra para ambos os casos sendo V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p 5 μm .

Por meio da análise qualitativa visual da Fig. 4.39 percebe-se que, apesar das duas situações retratarem uma boa qualidade de acabamento resultante, em (a) as marcas de avanço oriundas pela passagem do microrrebolo comparativamente a (b) se apresentaram mais ressaltadas, contribuindo para os maiores valores de rugosidade encontrados. Ainda, as bordas tanto para o lado concordante (em cima) quanto para o discordante do corte (embaixo) dos microcanais em (a) são mais heterogêneas com presença de rebarbas, fato este que não é observado em (b), em que as laterais apresentaram um aspecto mais homogêneo ao longo de todo o comprimento usinado. A presença de uma camada de menor dureza e resistência mecânica sob a superfície na peça passivada pode ter amortizado o contato inicial do abrasivo ao entrar para remover material, promovendo um corte suavizado e menos desgastante para a ferramenta, resultando uma usinagem mais uniforme capaz de alcançar valores de Ra na faixa dos 30 nm. A camada passivada também pode ter atuado como agente modificador da interface cavaco-ferramenta favorecendo o microcorte, promovendo redução da deformação plástica superficial e subsuperficial e reduzindo a adesão de material na peça e na ferramenta.

4.6.1.1 Análise estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada por meio da ANOVA, estando apresentada nas Tabs. 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, para os parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rz , Rp , Rv e Rt , respectivamente. Para tanto, foram considerados 3 fatores como variáveis

independentes, a tensão elétrica V , o tempo de passivação t e a velocidade de corte do microrrebolo V_s , cada um avaliado em três níveis.

Tabela 4.7 - ANOVA para o R_a dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e V_s .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F -valor	p -valor
V	0,016429	1	0,016429	21,33829	0,000120
t	0,000790	1	0,000790	1,02595	0,321650
V_s	0,006668	1	0,006668	8,66039	0,007305
Erro	0,017708	23	0,000770		

Tabela 4.8 - ANOVA para o R_q dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e V_s .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F -valor	p -valor
V	0,029745	1	0,029745	19,53151	0,000198
t	0,001144	1	0,001144	0,75119	0,395052
V_s	0,012713	1	0,012713	8,34749	0,008277
Erro	0,035028	23	0,001523		

Tabela 4.9 - ANOVA para o R_z dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e V_s .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F -valor	p -valor
V	1,201405	1	1,201405	15,17595	0,000729
t	0,040978	1	0,040978	0,51763	0,479102
V_s	0,433784	1	0,433784	5,47949	0,028277
Erro	1,820796	23	0,079165		

Tabela 4.10 - ANOVA para o R_p dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e V_s .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F -valor	p -valor
V	0,359722	1	0,359722	7,839754	0,010171
t	0,009040	1	0,009040	0,197012	0,661292
V_s	0,134639	1	0,134639	2,934315	0,100166
Erro	1,558739	23	0,045884		

Tabela 4.11 - ANOVA para o R_v dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e V_s .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F -valor	p -valor
V	0,246369	1	0,246369	22,04792	0,000099
t	0,011522	1	0,011522	1,03109	0,320467
V_s	0,085084	1	0,085084	7,61425	0,011162
Erro	0,257008	23	0,011174		

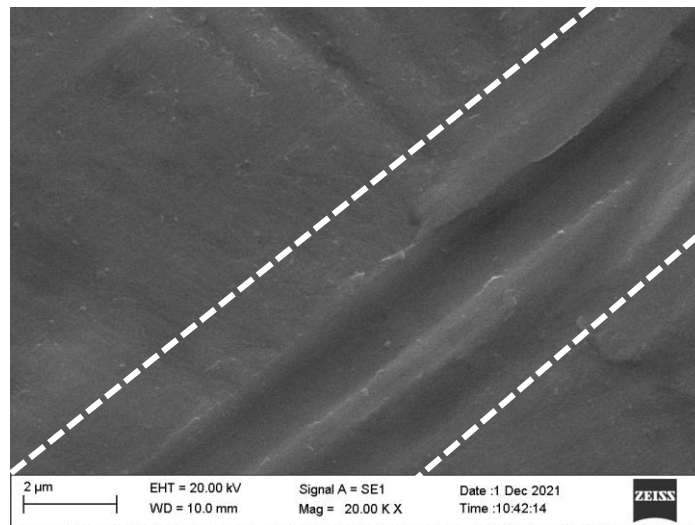
Tabela 4.12 - ANOVA para o R_t dos canais microrretificados em superfícies de Ti-6Al-4V passivadas eletroquimicamente considerando como variáveis independentes V , t e V_s .

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F -valor	p -valor
V	2,175976	1	2,175976	11,29387	0,002704
t	0,047811	1	0,047811	0,24815	0,623111
V_s	0,837020	1	0,837020	4,34434	0,048428
Erro	4,431383	23	0,192669		

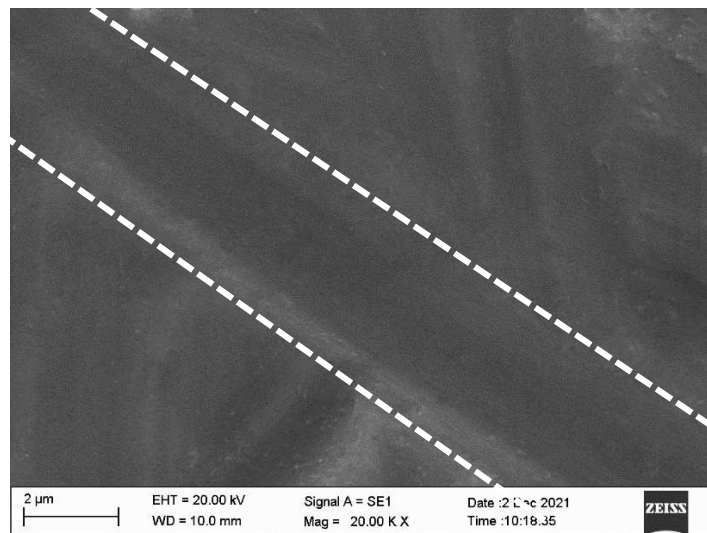
Para um nível de confiabilidade de 95 %, as tabelas de ANOVA mostram que o fator tempo t não produziu efeitos estatisticamente significativos para nenhum dos parâmetros de rugosidade avaliados, ao contrário do fator tensão V , no qual foram obtidos p -valores menores que 0,05 para todas as variáveis dependentes. Em relação a V_s , continuou-se a exibir uma relação linear com R_a , R_q , R_z , R_v e R_t , com exceção ao R_p , concluindo-se que a média das leituras de medição para o parâmetro em questão não foi suficiente para provocar tais efeitos.

4.6.1.2 Mecanismo de remoção de material

Por meio de novas imagens de MEV foi possível identificar os mecanismos de remoção de material predominantes atuantes na fabricação dos microcanais, em que basicamente foram encontradas condições de microcorte e microsulcamento. Na Figura 4.40 são exemplificadas tais condições.



(a)



(b)

Figura 4.40 – Imagens em MEV exemplificando em (a) microsulcamento e em (b) microcorte.

Na Figura 4.40a é apresentada uma condição de microsulcamento (ou *microplowing*) caracterizada pelo deslocamento de material direcionado às bordas do sulco, ressaltando-as, tal como apresentado por Amzallag *et al.* (1982) e Zum Gar (1987). Na Figura 4.40b, entretanto, a penetração do abrasivo na superfície usinada corta material em regime dúctil de trabalho sem ocasionar levantamento das bordas na orientação da usinagem, caracterizando a condição de microcorte, conforme também mostrado por Zum Gar (1987). Como a ferramenta de corte durante a usinagem para as diferentes peças após a passivação das superfícies em condições distintas demonstrou não apresentar avarias significativas nem das partículas abrasivas e nem do ligante, os dois mecanismos estiveram presentes em praticamente todo o processo, visto que

geralmente o microcorte é mais presente quando a ferramenta abrasiva se encontra em estado afiada.

Importante destacar que o microsulcamento isolado não favorece a remoção de material, mas sim deformação plástica superficial e subsuperficial em níveis superiores ao microcorte. O microcorte é o principal mecanismo de remoção que deve ser buscado em processo de retificação de ultraprecisão, como apontado por Brinksmeier *et al.* (2010), Fiocchi (2010), Fiocchi (2014), Fiocchi *et al.* (2015), Fiocchi *et al.* (2016), possibilitando a obtenção de superfícies de elevada precisão dimensional e acabamentos superficiais que podem atingir faixas nanométricas de rugosidade, conforme explica Aurich *et al.* (2015).

Quando da adesão de material na ferramenta o microsulcamento pode acontecer com remoção de material, porém com menor eficiência a vista a maior pressão específica de corte devido ao trabalho realizado na deformação plástica. Nessa situação a rugosidade também é afetada negativamente no contexto da usinagem de ultraprecisão (aumento dos valores).

Sucessivos microsulcamentos localizados introduzem defeitos na rede cristalina que podem culminar com a remoção de material como apontado por Fiocchi (2014), Fiocchi *et al.* (2015) e Fiocchi *et al.* (2016).

4.6.1.3 Topografias superficiais

De modo a complementar a caracterização qualitativa da usinagem foram também obtidas imagens topográficas das regiões contendo os microcanais fabricados. Essas imagens são apresentadas na Fig. 4.41, em que V representa a tensão elétrica utilizada e t o tempo de ensaio de passivação. A numeração dos canais em 1, 2 e 3 refere-se às condições de V_s igual a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, respectivamente.

Na Figura 4.41, as distintas cores retratam as diferenças entre as alturas dos pontos que determinam a superfície efetiva, em que os canais são visivelmente delimitados em decorrência da profundidade de corte considerada. Em virtude do referenciamento das superfícies no perfilômetro 3D (sem contato) ter sido realizado manualmente para cada uma das peças posicionadas individualmente sob a mesa de medição do equipamento, fixas em um porta-peças para evitar possíveis deslocamentos durante a leitura, e considerando a não homogeneidade das espessuras das peças, as superfícies apresentaram variações na tonalidade das cores e nas paletas de escala.

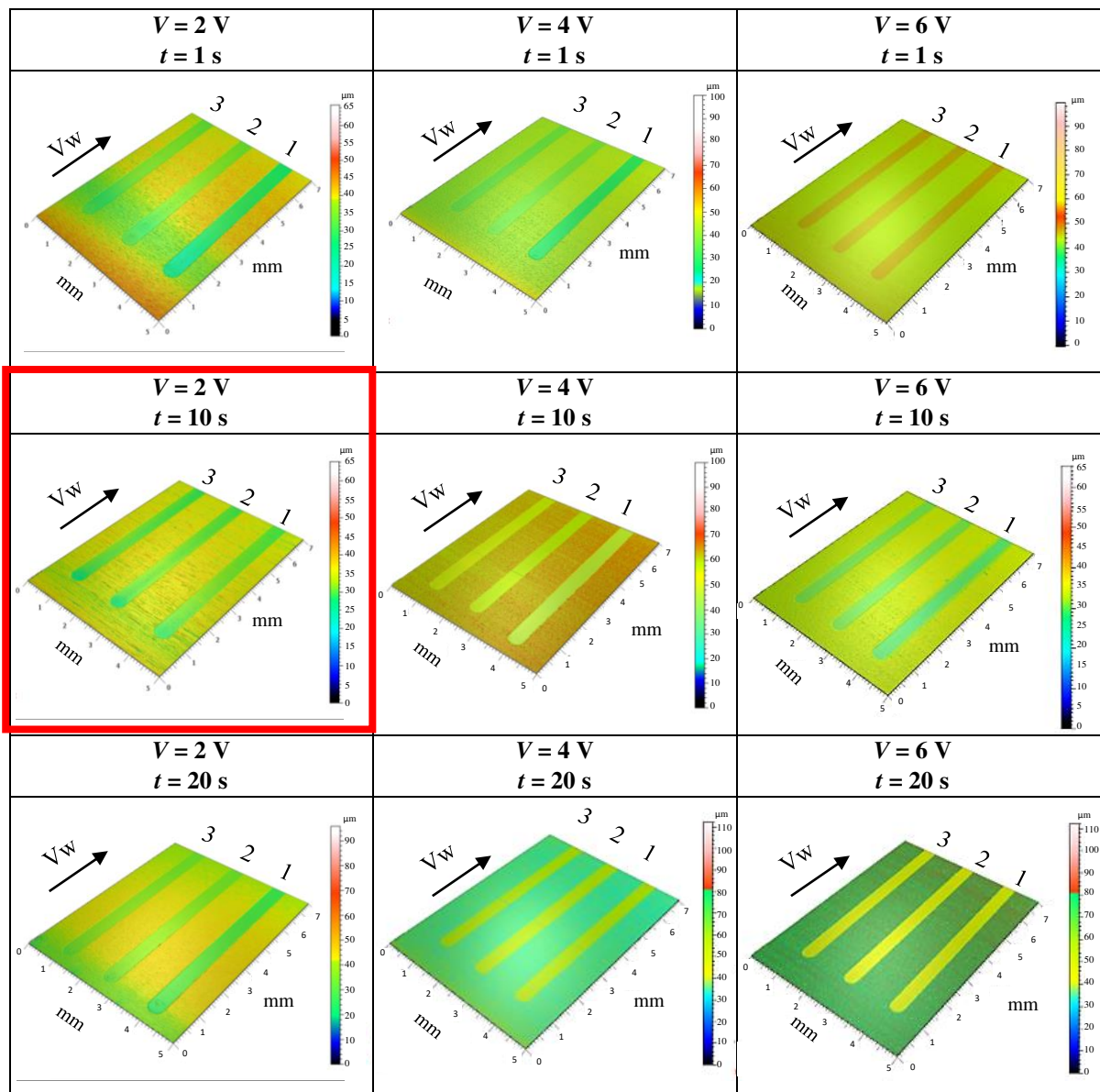


Figura 4.41 - Imagens topográficas dos microcanais fabricados a um a_p constante de $5 \mu\text{m}$ em peças de Ti-6Al-4V passivadas em diferentes condições de tensão (2 V, 4V e 6 V) e tempo de passivação (1 s, 10 s e 20 s), para um mesmo V_w 30 mm/min e as numerações 1, 2 e 3 referente à V_s adotada, igual a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, respectivamente.

Com base na faixa de ampliação utilizada para obtenção das imagens topográficas não foram identificadas formações significativas de rebarbas nas bordas laterais dos canais. Imagens obtidas em MEV dos microcanais usinados confirmam tal apontamento, em que são apresentadas na Fig. 4.42 as imagens para a situação destacada em vermelho, que se refere às condições de corte V_w 30 mm/min, a_p $5 \mu\text{m}$ e V_s (a) 1,35 m/s, (b) 2,00 m/s e (c) 2,65 m/s, em uma superfície passivada à tensão 2 V e tempo de 10 s.

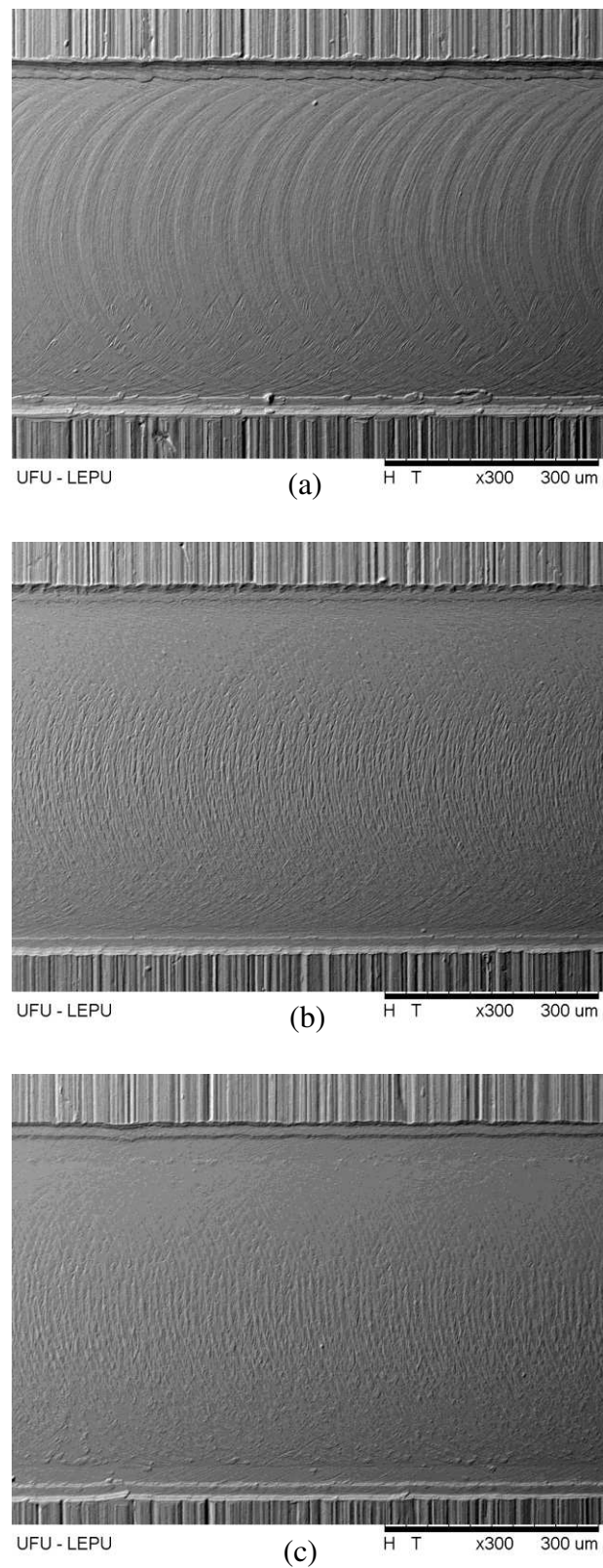


Figura 4.42 - Imagens em MEV dos canais microrretificados a um V_w 30 mm/min, a_p 5 μm e V_s (a) 1,35 m/s, (b) 2,00 m/s e (c) 2,65 m/s, para uma superfície de Ti-6Al-4V passivada à tensão de 2 V e tempo passivação 10 s.

4.6.2 Canais usinados com a_p variável

De modo a abranger uma representação completa das superfícies usinadas, nas Figuras 4.43 a 4.69 são mostrados os perfis brutos (ondulações mais rugosidade) nivelados obtidos pela medição com o perfilômetro de contato dos microcanais considerando um desnivelamento da peça em $+5\ \mu\text{m}$ e V_w de $30\ \text{mm/min}$, para cada uma das 9 superfícies passivadas, a um comprimento usinado de aproximadamente $10,5\ \text{mm}$. Em cada figura, (a) corresponde à usinagem com V_s de $1,35\ \text{m/s}$ ($30\ 000\ \text{rpm}$), (b) V_s $2,00\ \text{m/s}$ ($45\ 000\ \text{rpm}$) e (c) V_s $2,65\ \text{m/s}$ ($60\ 000\ \text{rpm}$). Os perfis foram fracionados em 14 partes, numeradas de 1 a 14, sendo avaliada a rugosidade em cada uma das sub-regiões com um *cut-off* único de $0,08\ \text{mm}$ e fornecido os valores de R_a e R_q . As medições foram realizadas no sentido crescente da profundidade de corte, conforme exibido na Fig. 4.43, e as unidades dos parâmetros são expressas em nm.

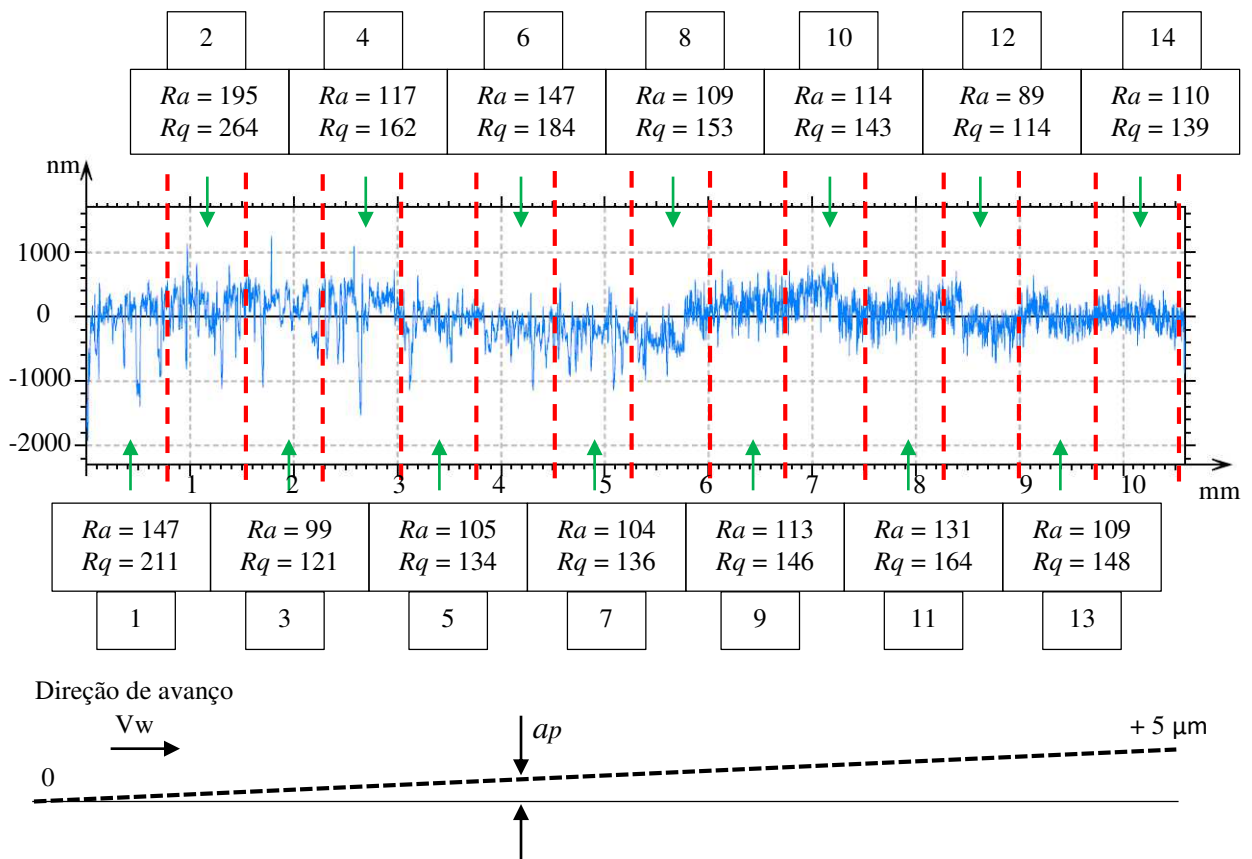


Figura 4.43 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de $30\ \text{mm/min}$ e V_s igual a $1,35\ \text{m/s}$, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de $2\ \text{V}$ e tempo de passivação de $1\ \text{s}$.

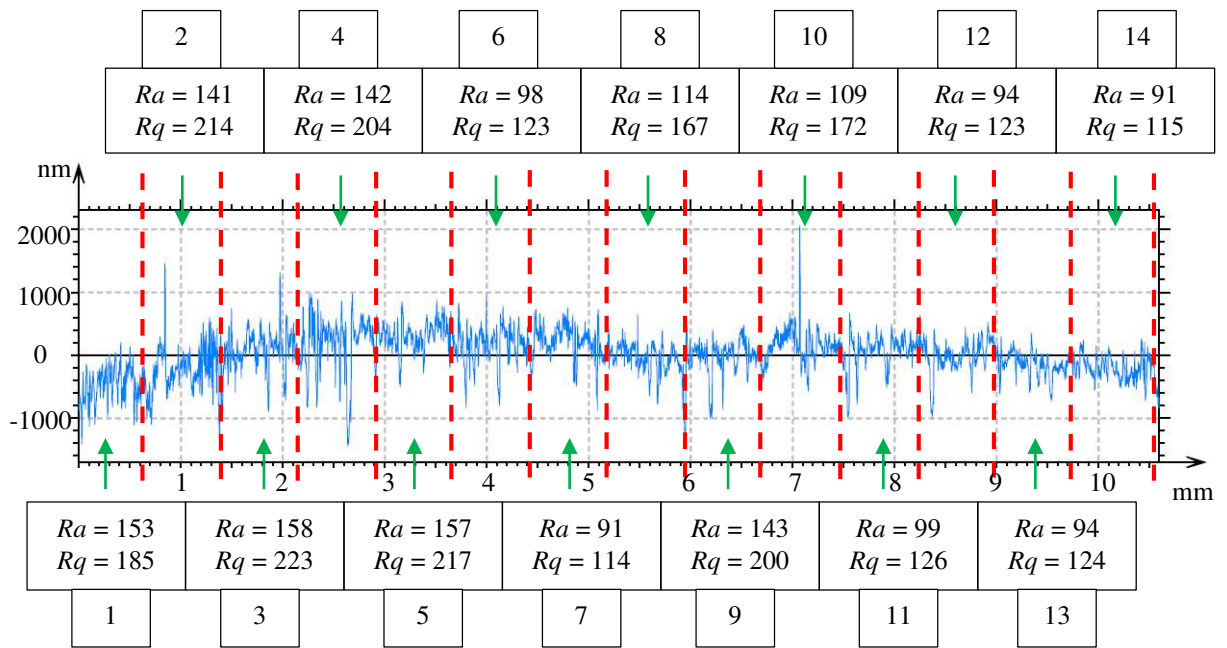


Figura 4.44 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s.

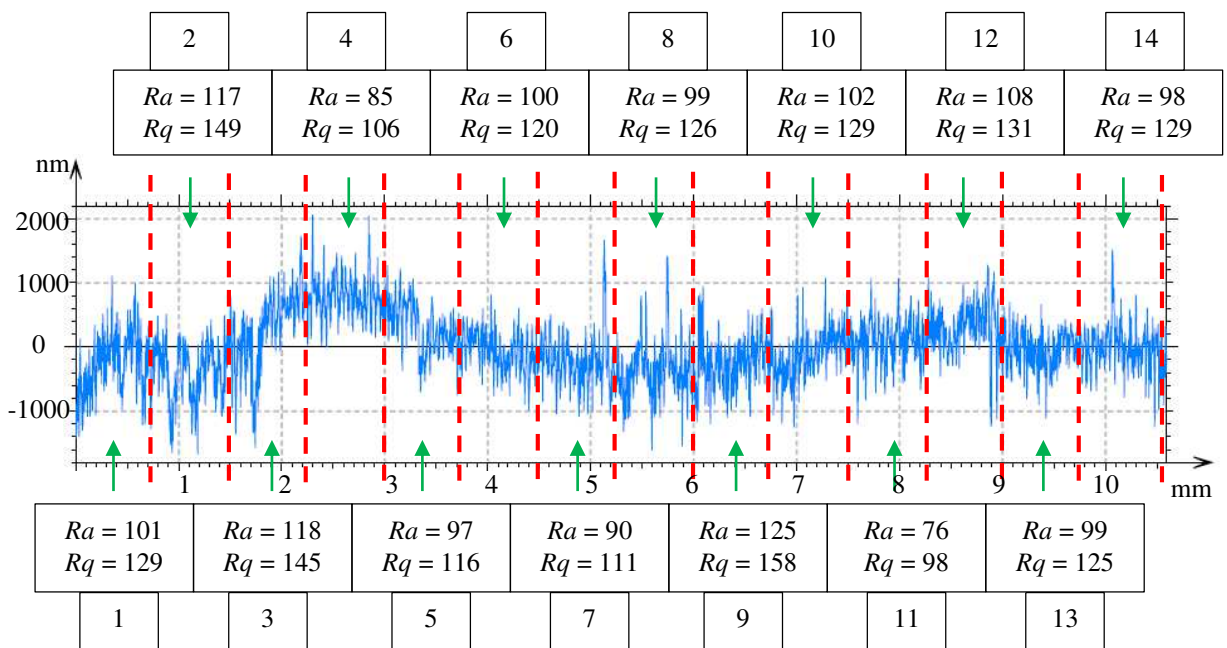


Figura 4.45 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s.

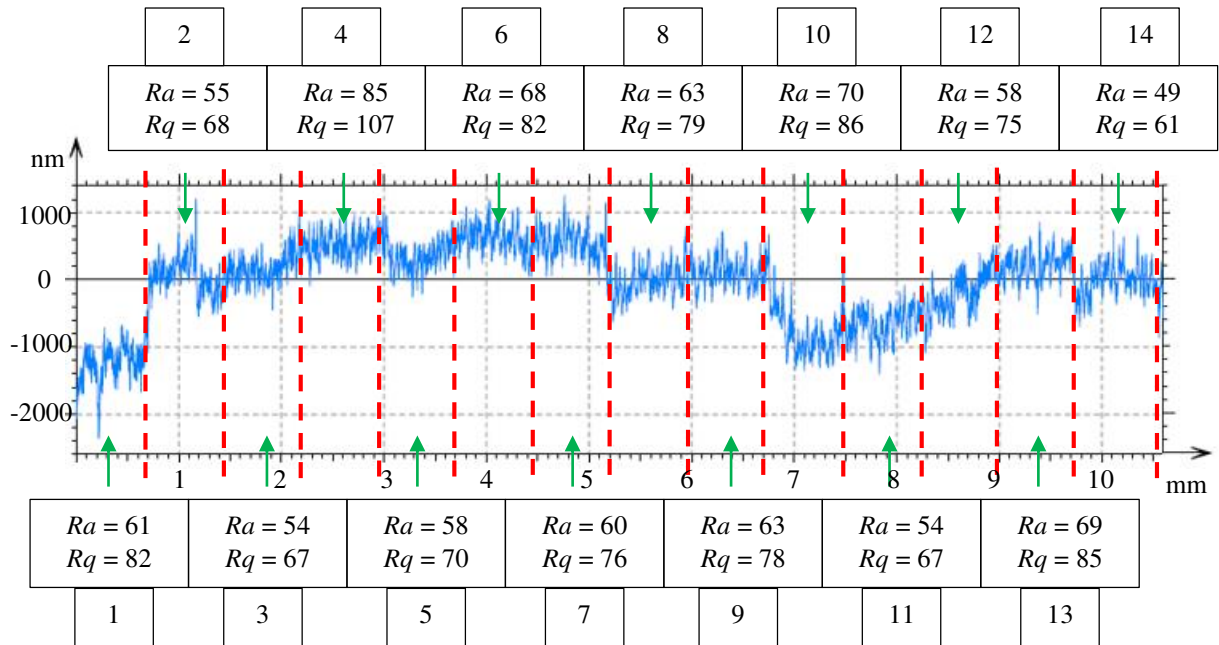


Figura 4.46 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s.

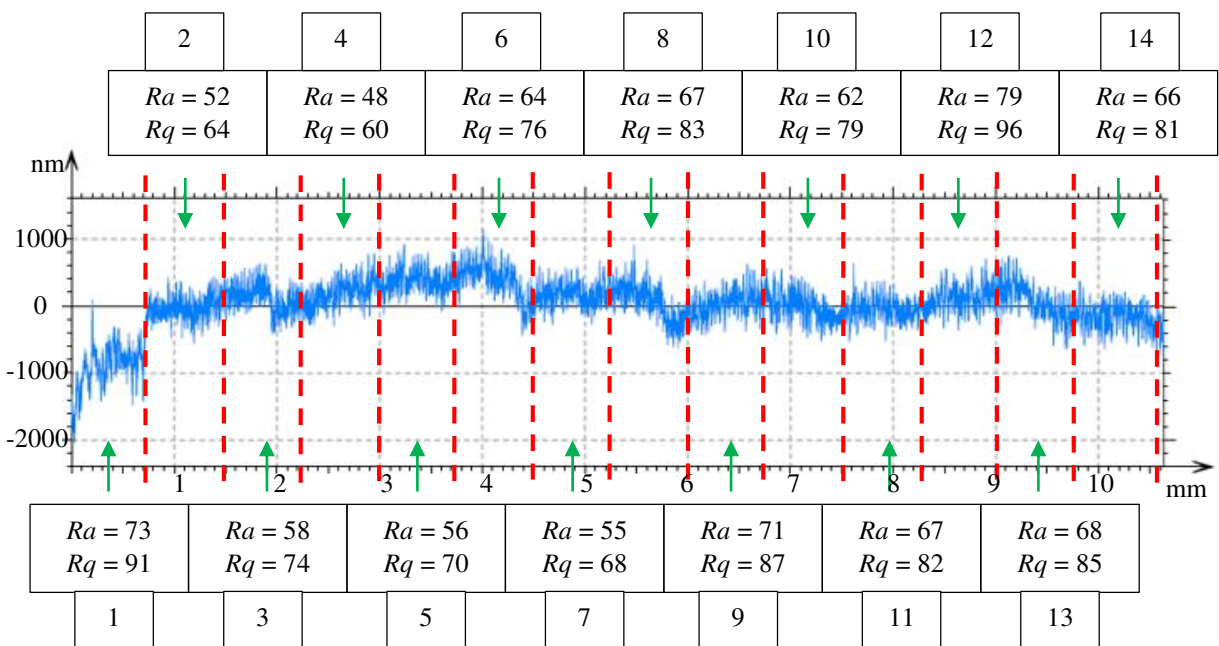


Figura 4.47 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s.

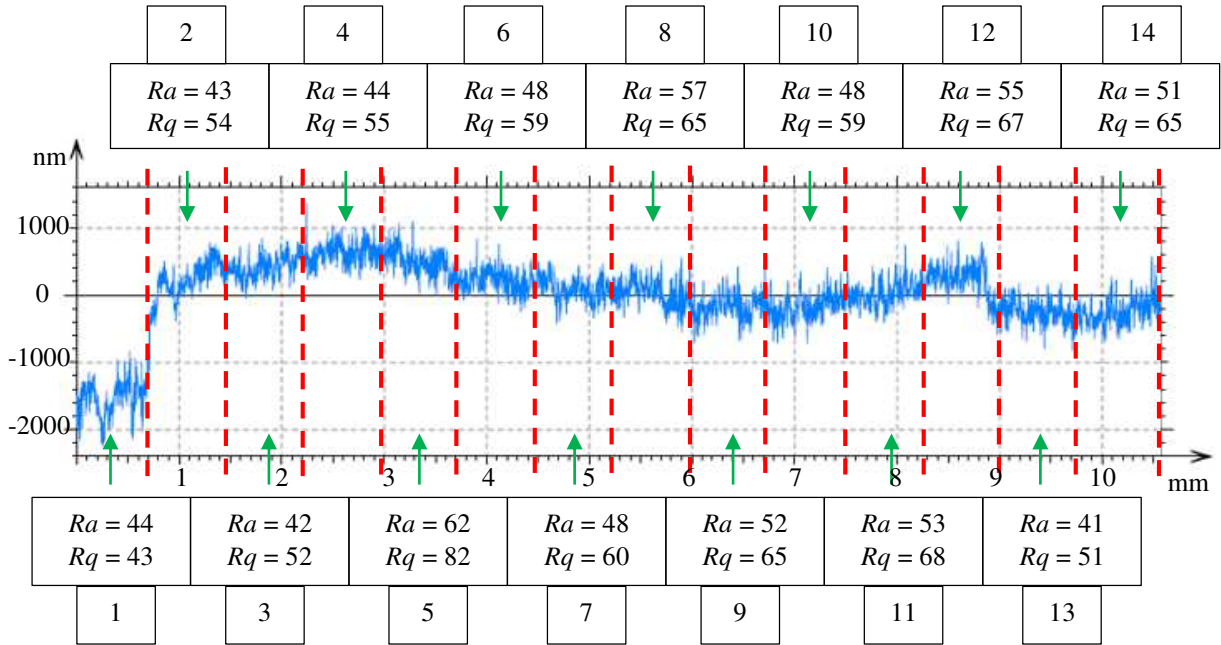


Figura 4.48 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s.

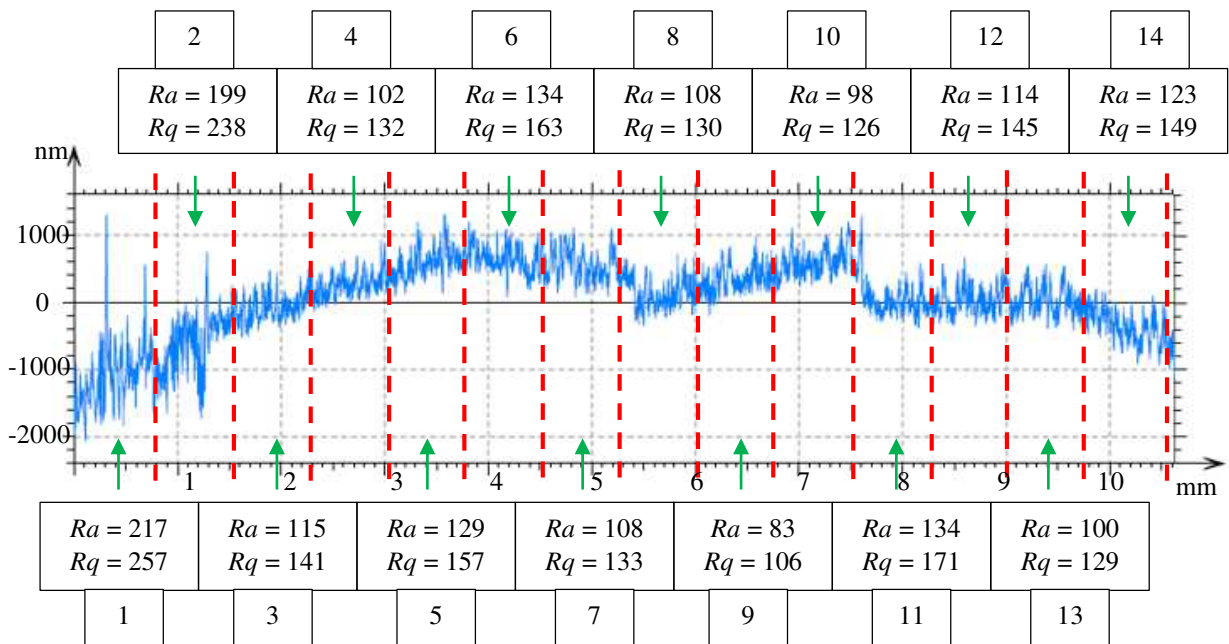


Figura 4.49 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.

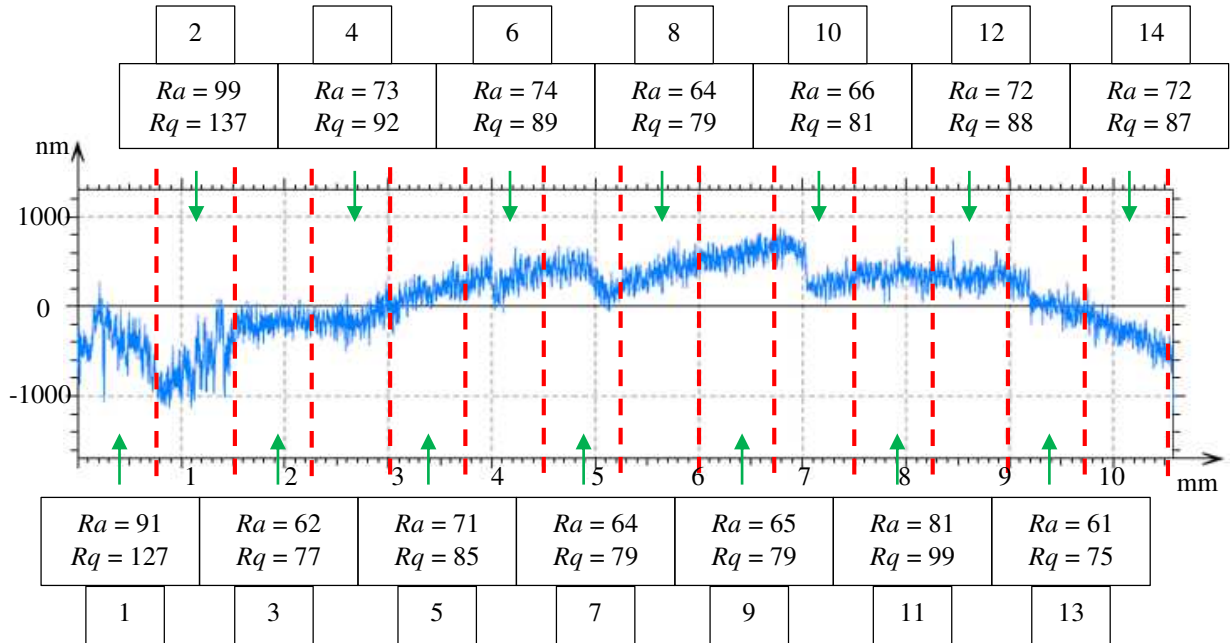


Figura 4.50 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.

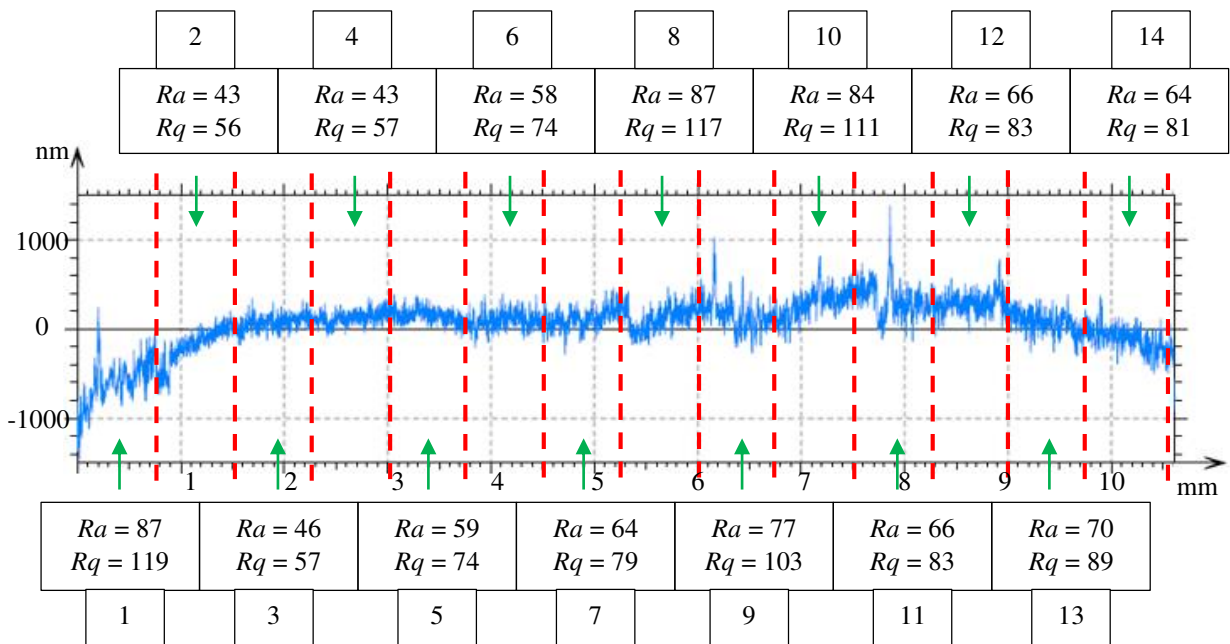


Figura 4.51 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.

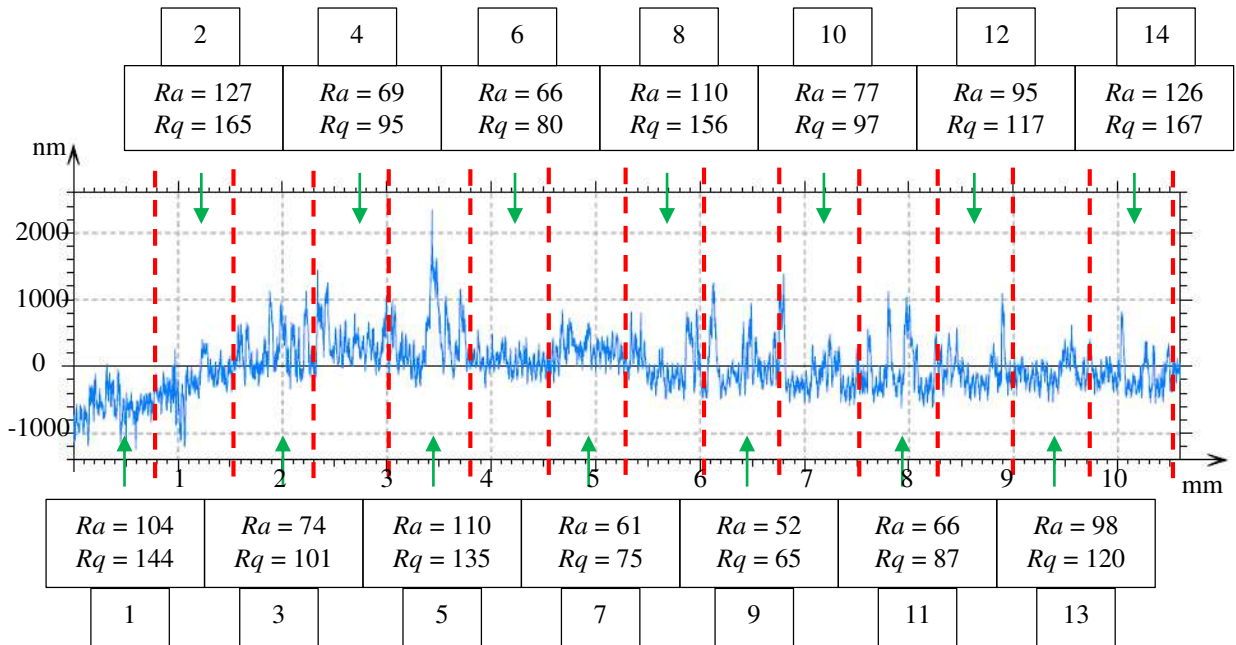


Figura 4.52 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.

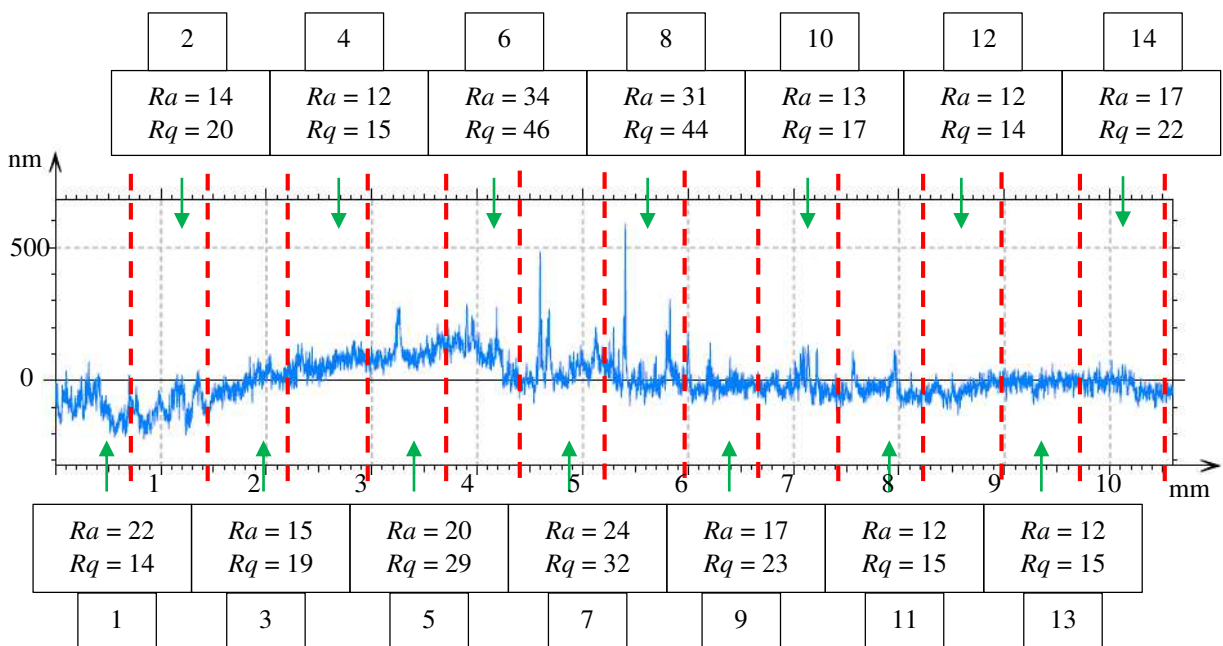


Figura 4.53 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.

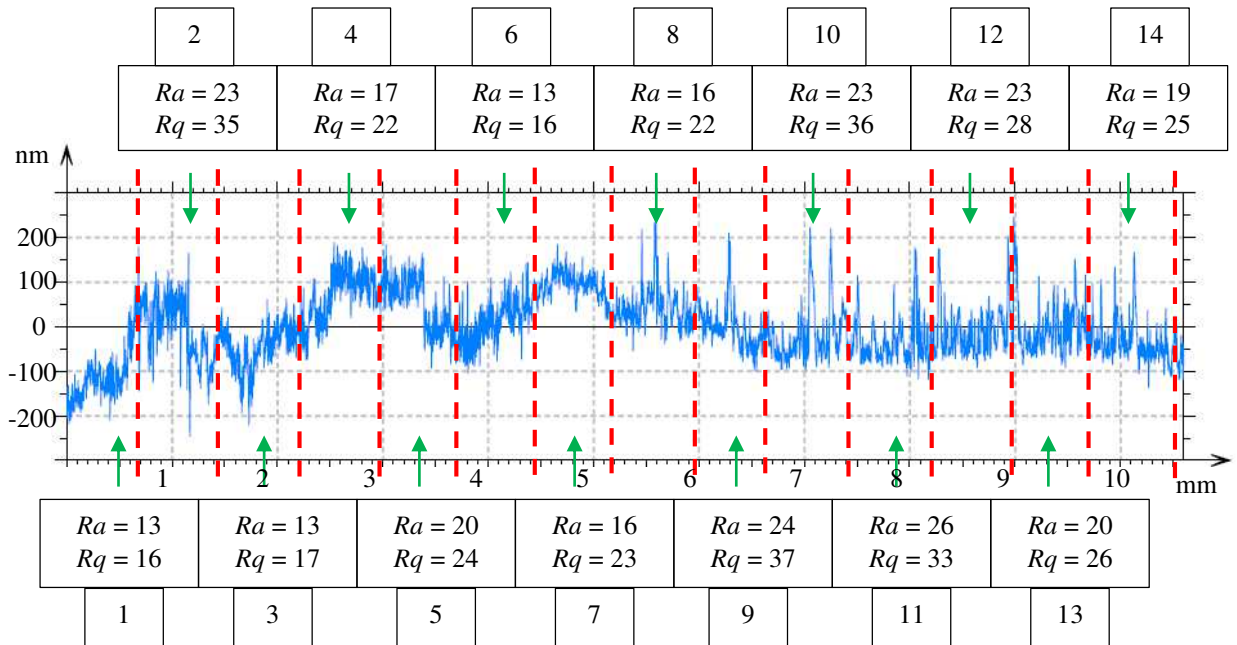


Figura 4.54 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.

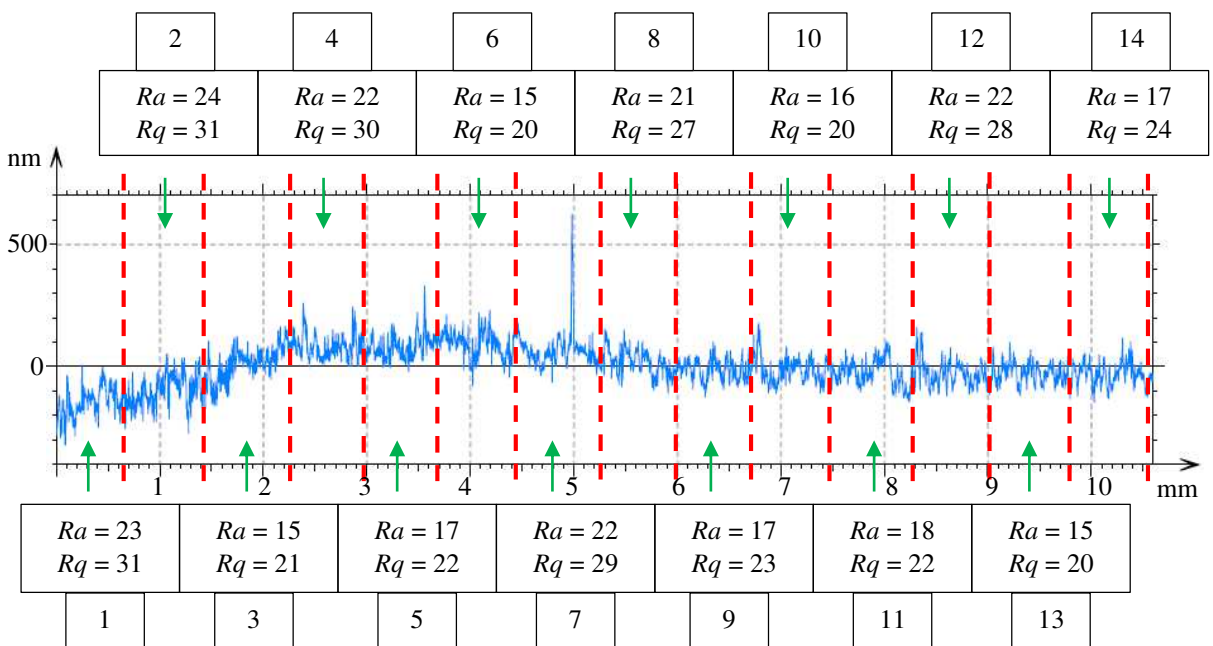


Figura 4.55 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.

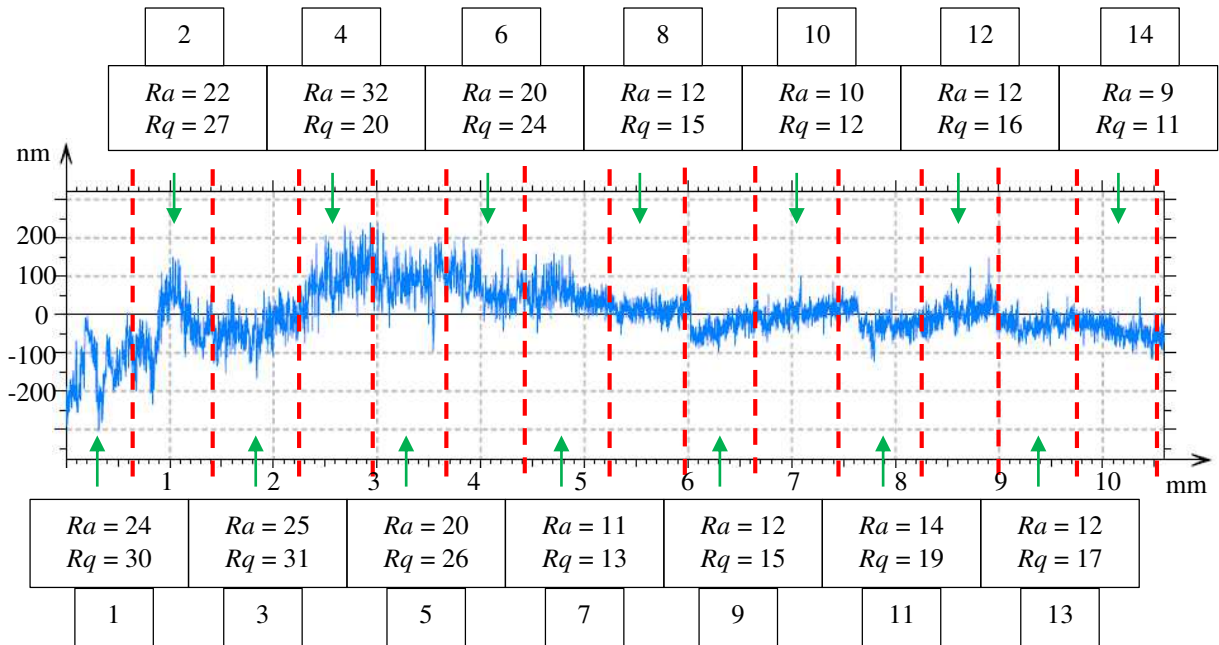


Figura 4.56 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.

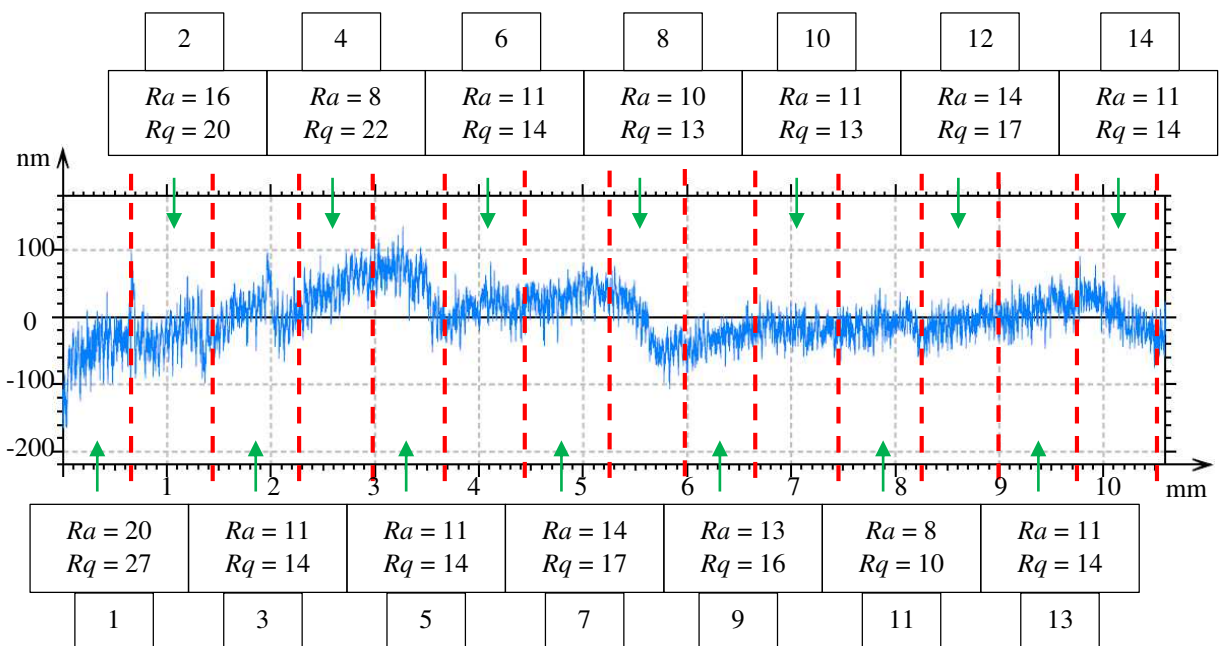


Figura 4.57 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.

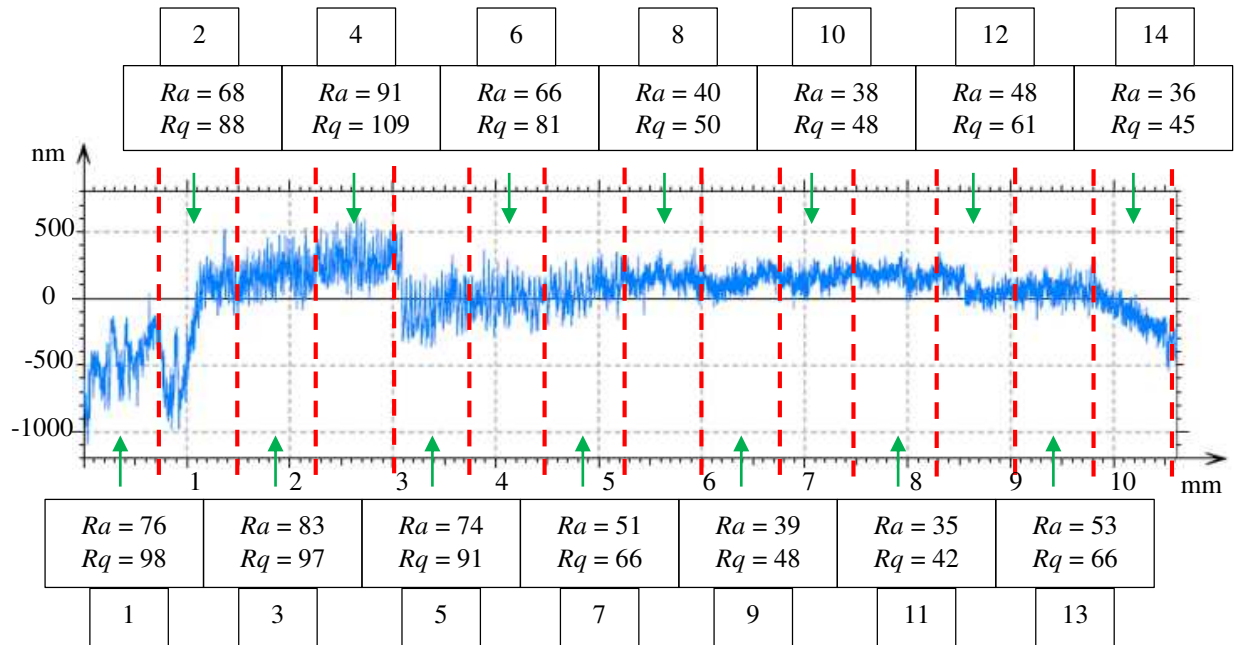


Figura 4.58 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.

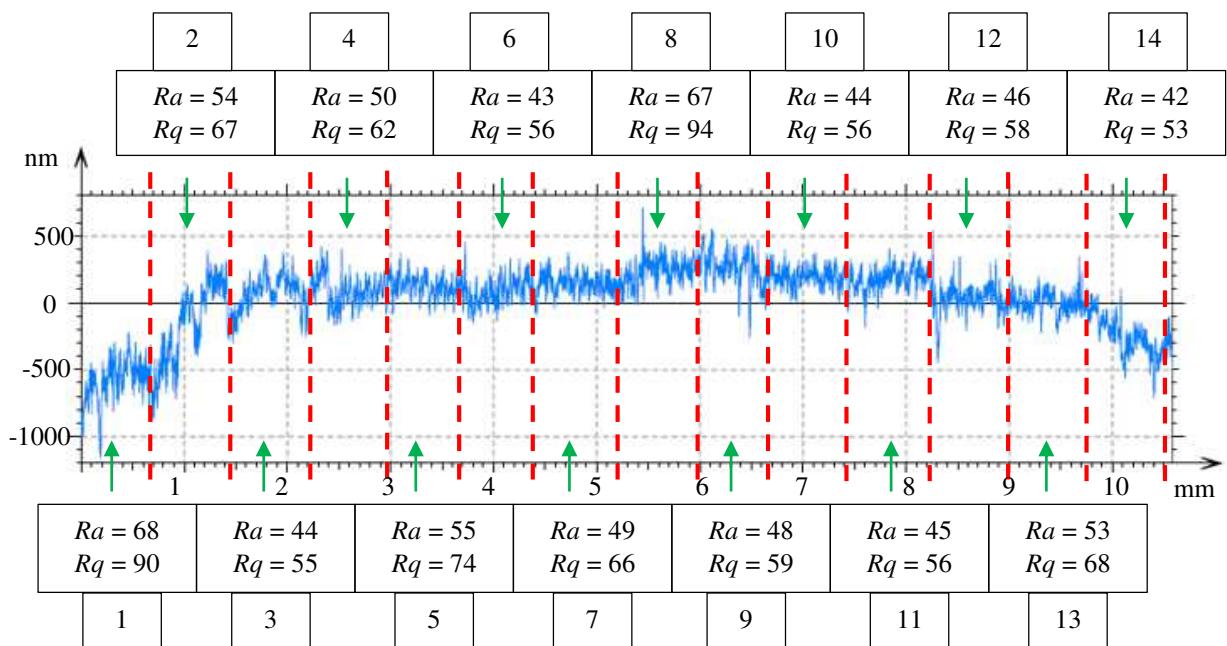


Figura 4.59 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.

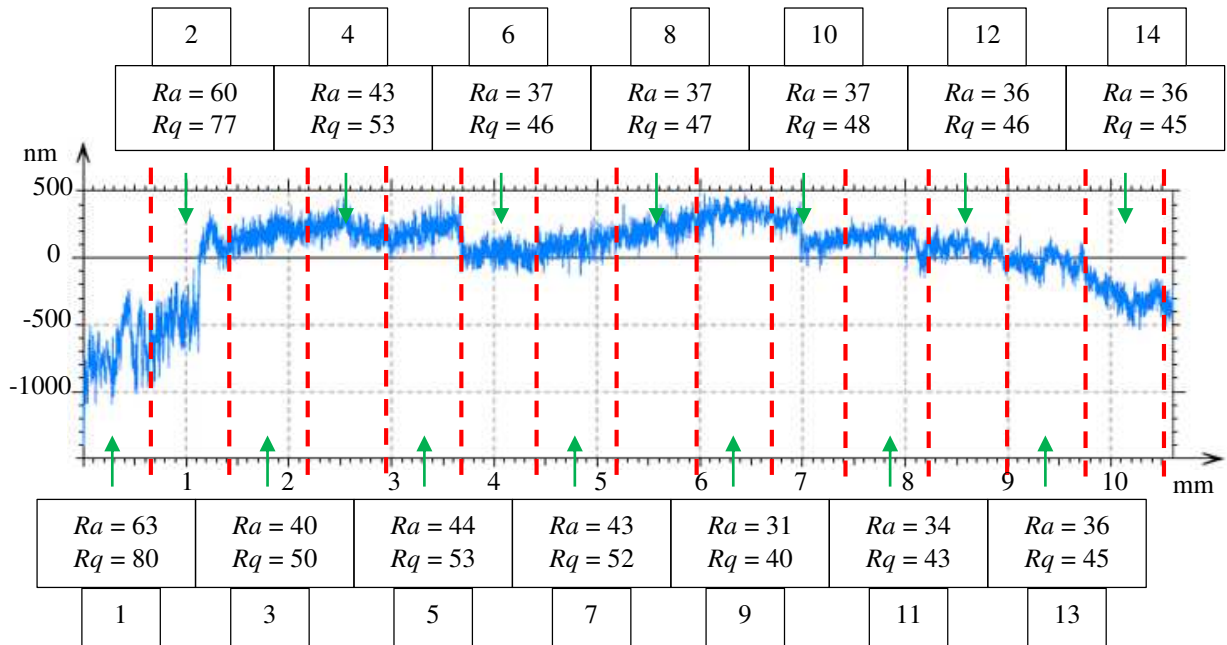


Figura 4.60 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.

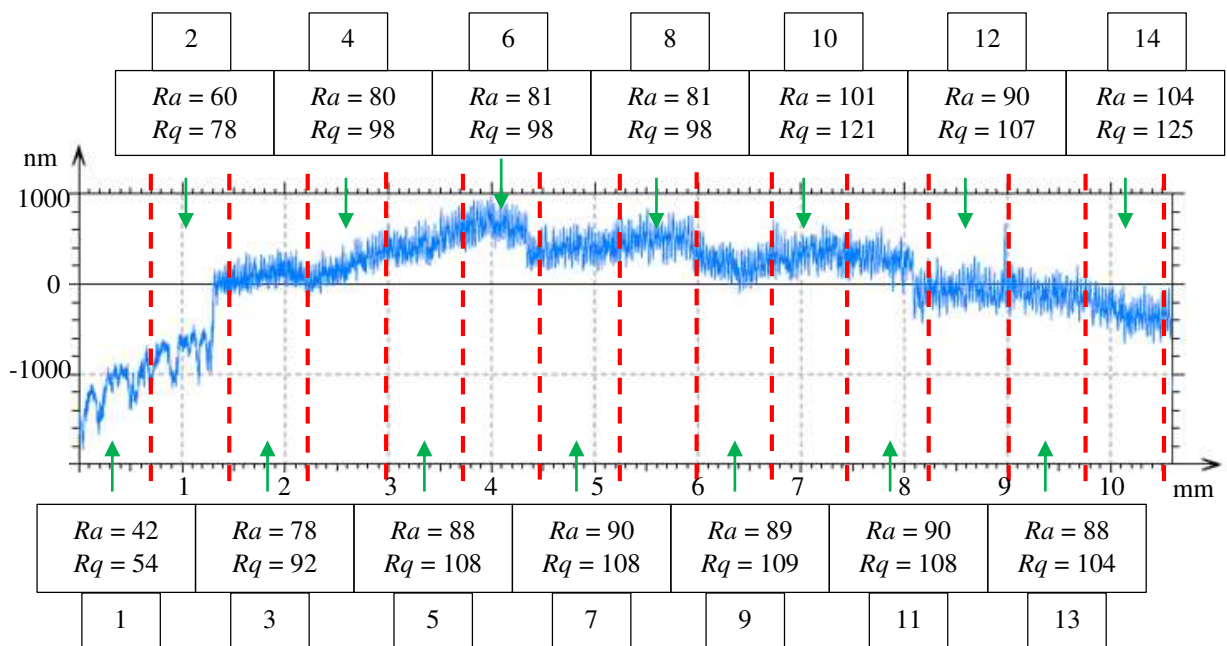


Figura 4.61 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.

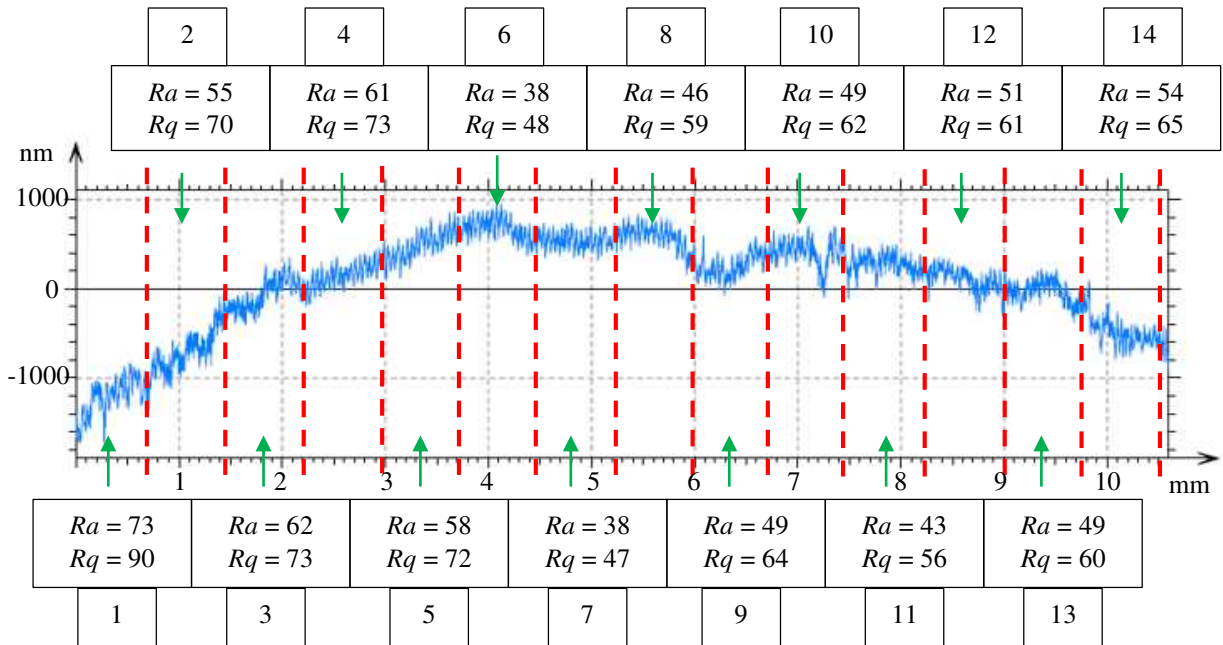


Figura 4.62 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.

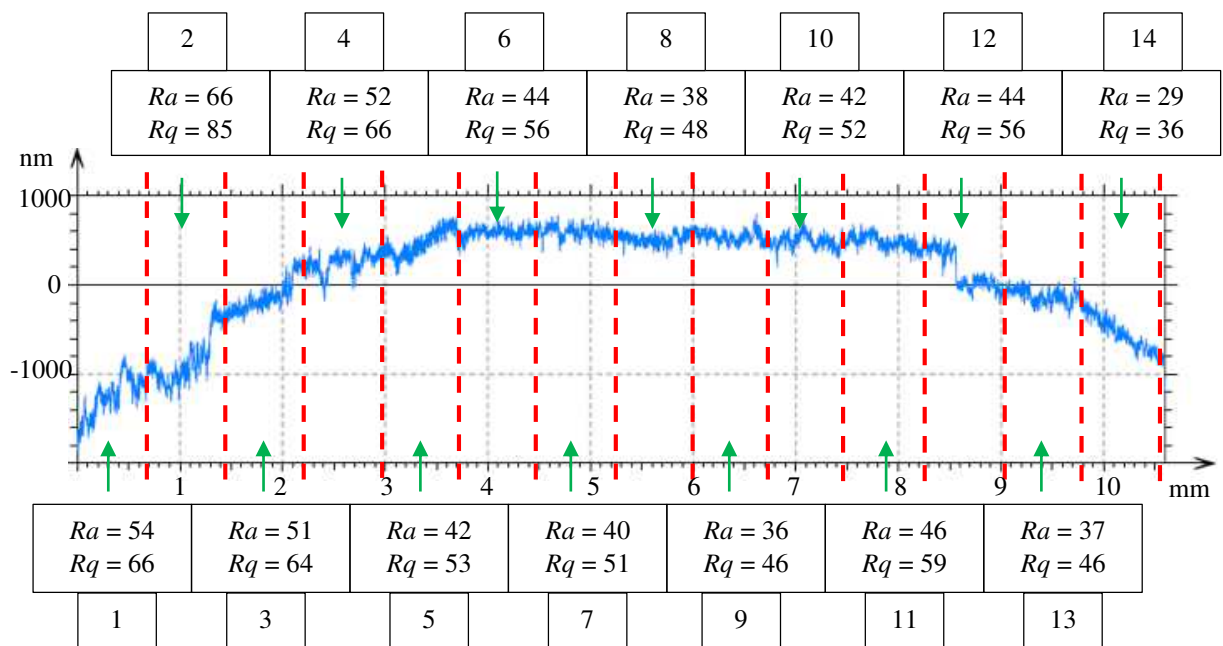


Figura 4.63 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.

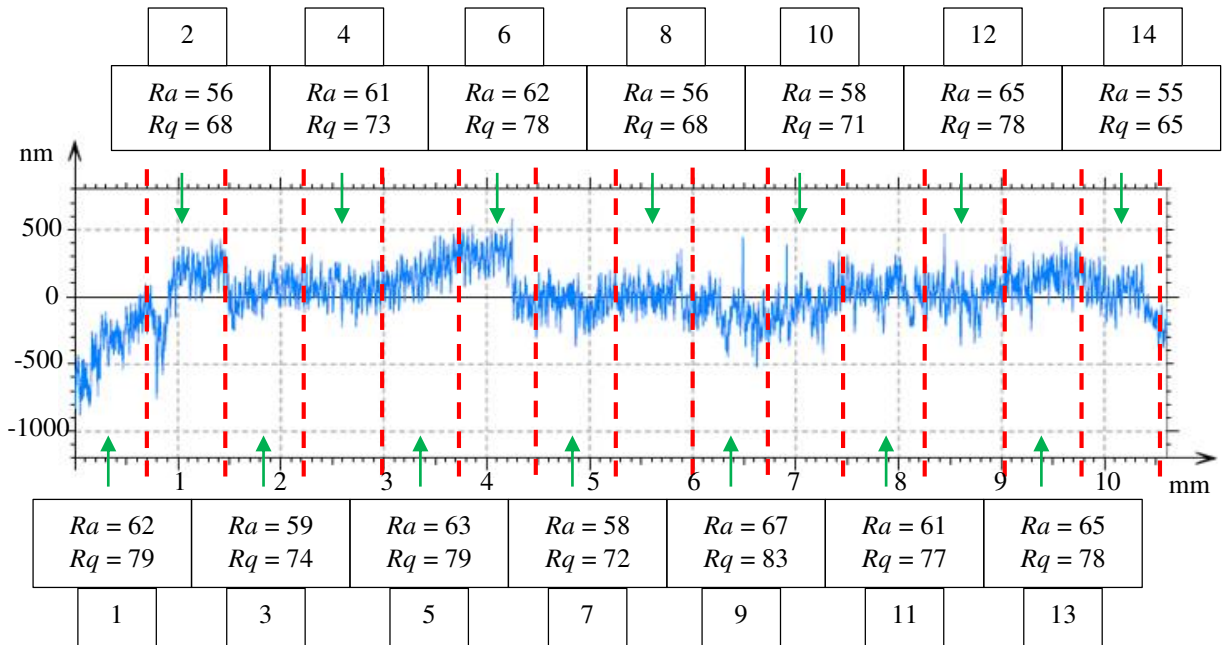


Figura 4.64 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.

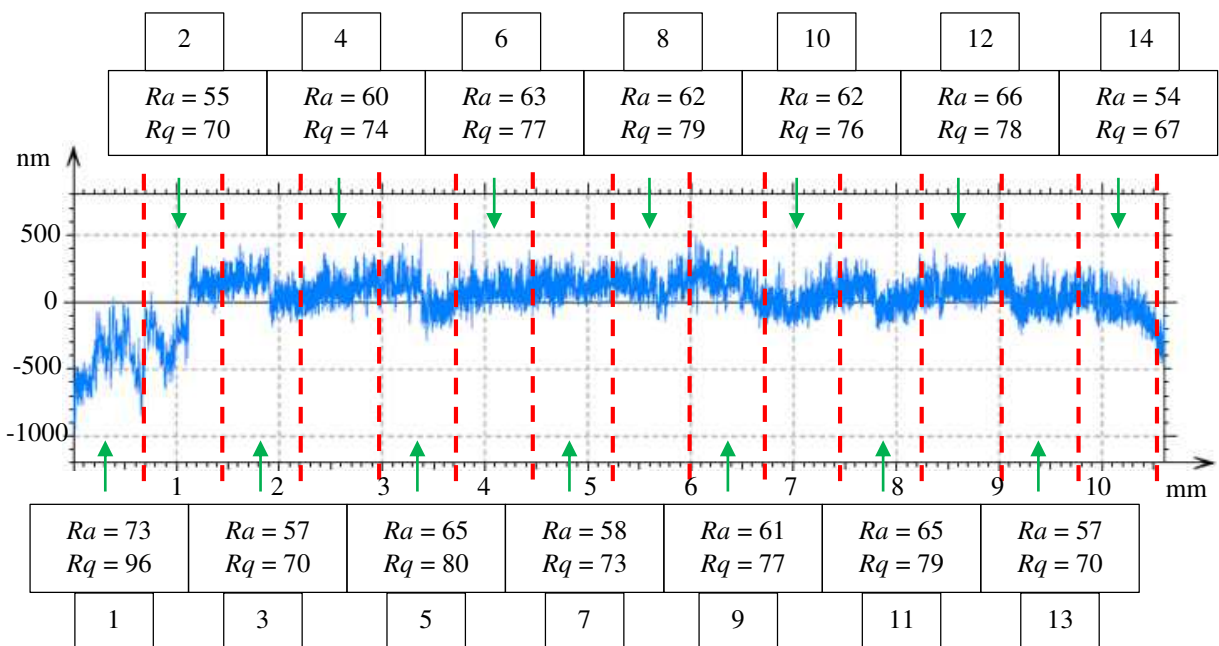


Figura 4.65 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.

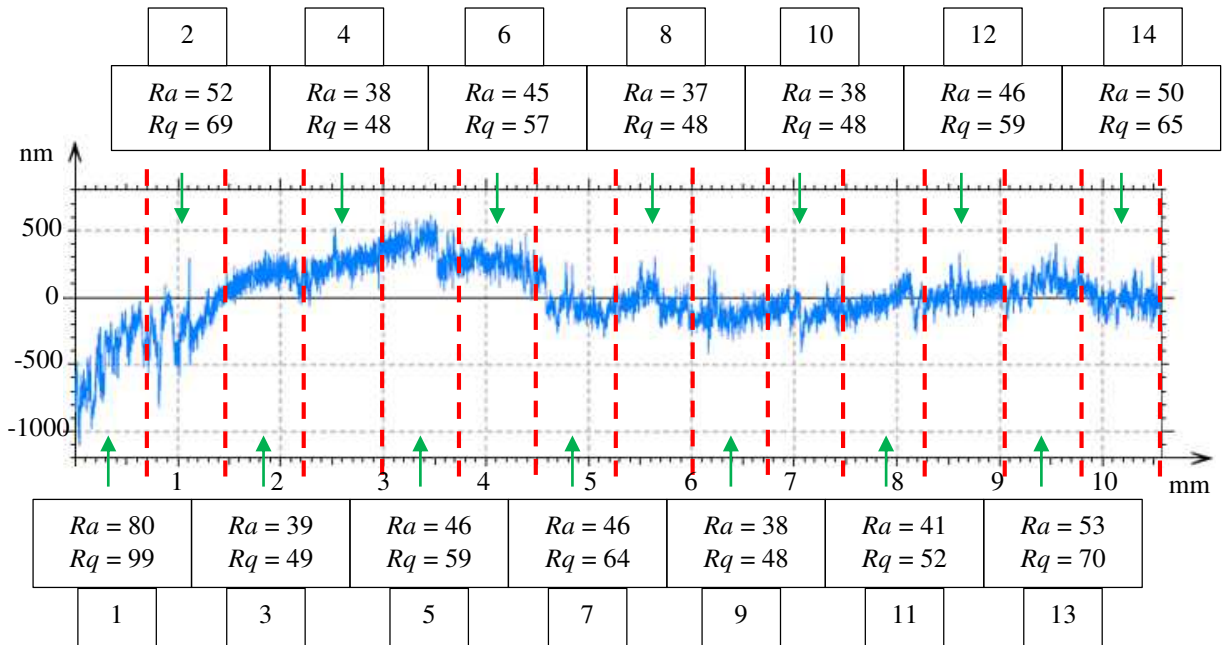


Figura 4.66 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.

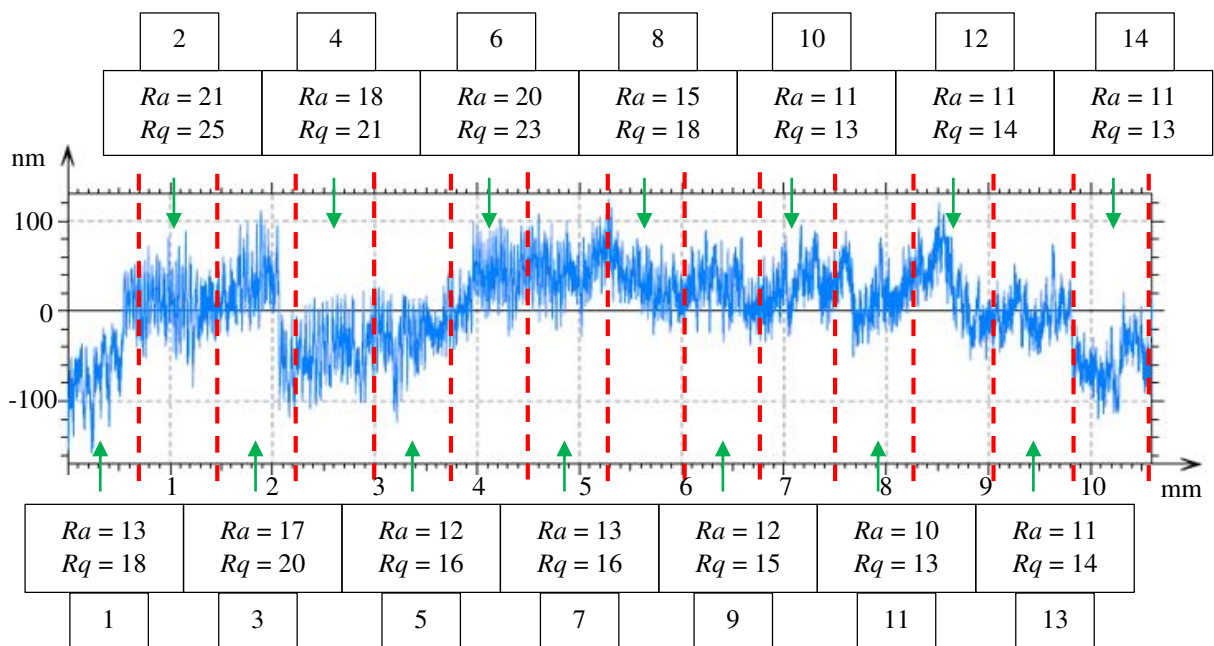


Figura 4.67 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.

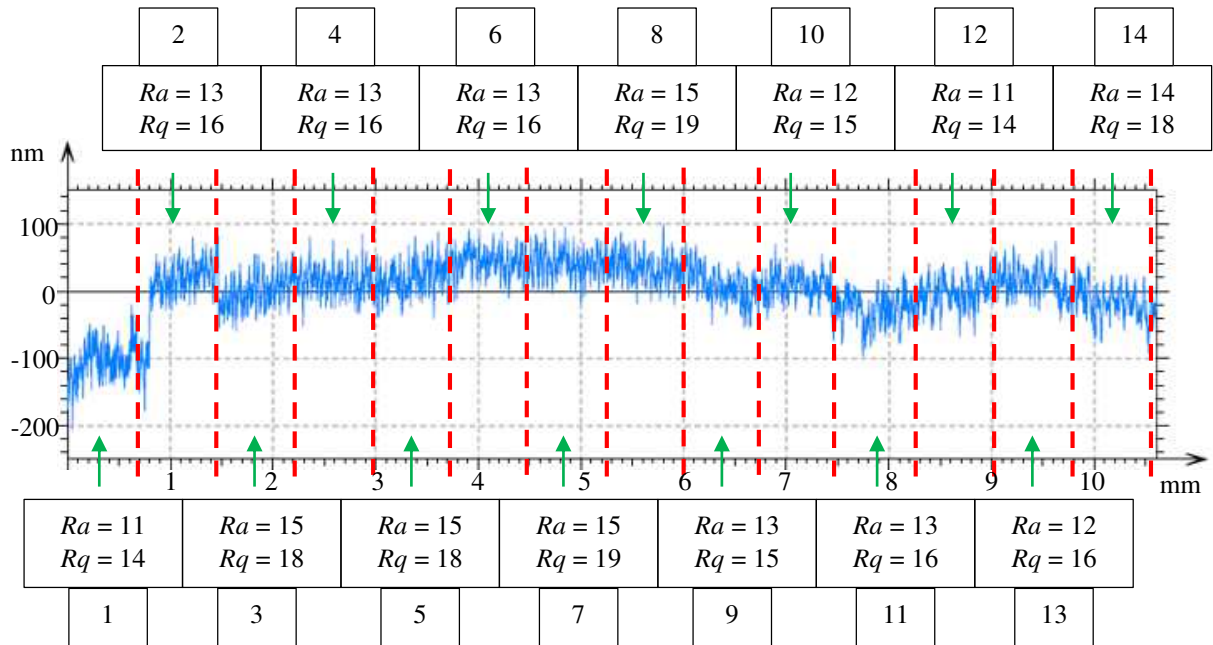


Figura 4.68 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com a_p variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,00 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.

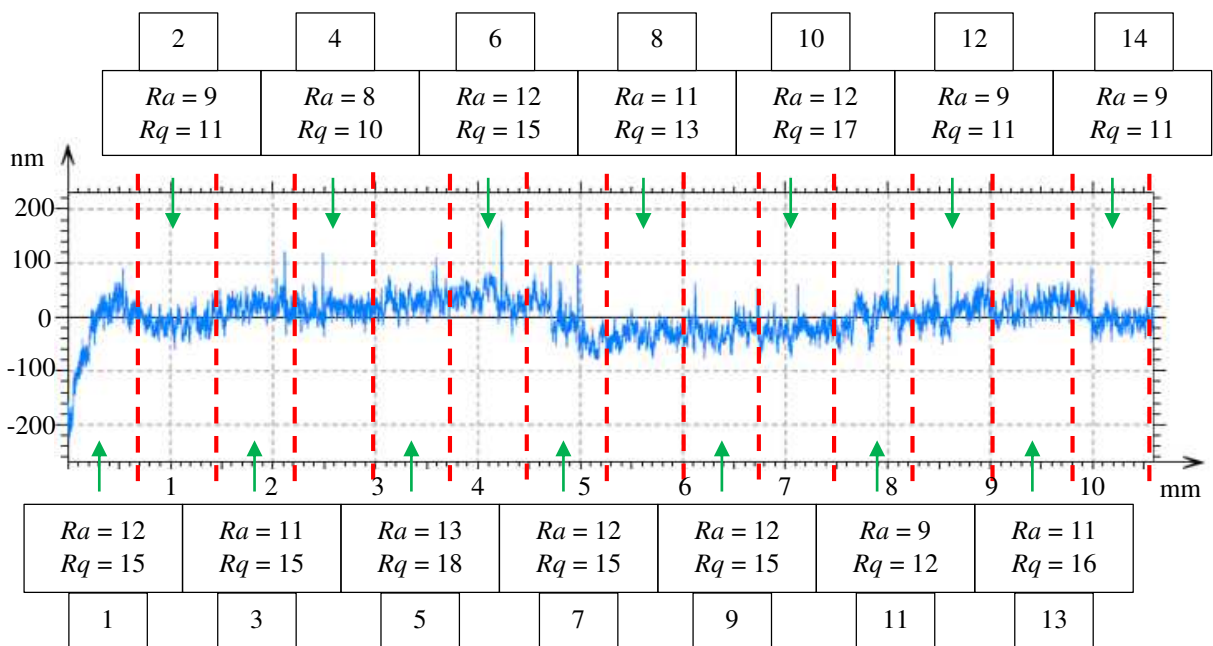


Figura 4.69 - Perfil bruto nivelado correspondente ao microcanal usinado com ap variável, V_w de 30 mm/min e V_s igual a 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.

Embora não seja possível estimar um comportamento único bem definido entre o aumento na profundidade de corte com os valores de Ra e Rq , destaca-se que para a maioria dos casos investigados, os piores acabamentos foram encontrados durante o trecho inicial da usinagem, em que com o aumento da profundidade de corte até 5 μm houve uma tendência à melhora da qualidade da superfície produzida e a rugosidade diminuiu. Tal acontecimento entra em conformidade com o abordado por Vinay e Rao (2013) e Brinskmeier *et al.* (2010) que afirmam que com o aumento no valor de ap eleva-se a quantidade de material removido em que o microcorte atua como o mecanismo de remoção de material prevaemente, promovendo a obtenção de menores valores de Ra . Enquanto não é ultrapassada a profundidade de corte mínima para formação de cavaco o topo do microrrebolo atrita com a superfície da peça promovendo deformações elásticas e plásticas, sendo a última responsável pela deterioração do acabamento.

Na Figura 4.70 são apresentados graficamente os valores médios de Ra considerando os 14 intervalos de subdivisão do perfil de rugosidade, para cada uma das condições investigadas, em que as barras de erros correspondem ao desvio padrão associado a medição, para uma confiabilidade de aproximadamente 68 %.

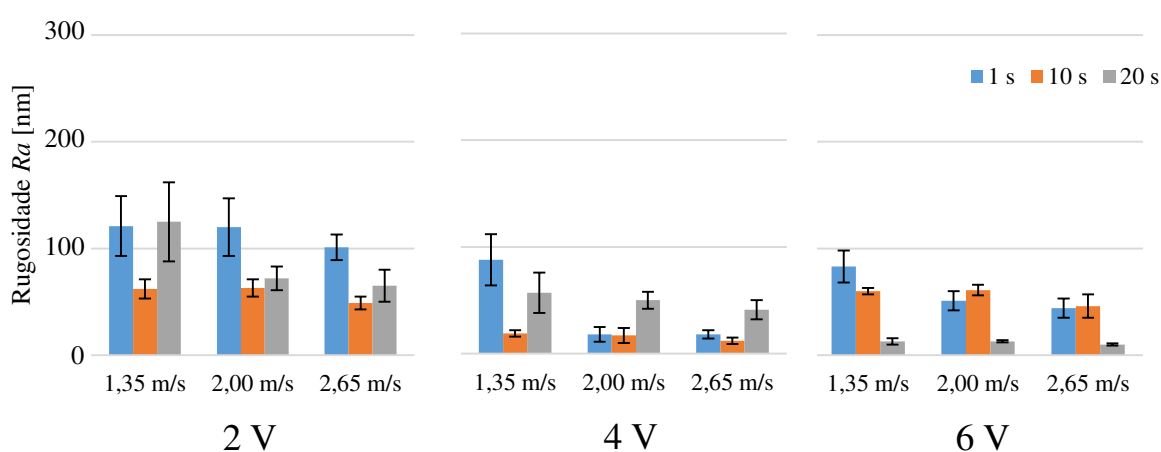


Figura 4.70 - Valores médios de Ra nos microcanais usinados a um ap variável, com barra de erros associada ao desvio padrão das leituras (68 %).

Na Tabela 4.13 são expressos numericamente esses mesmos valores médios de Ra para uma melhor visualização dos resultados, bem como os desvios padrão das leituras, considerando as diferentes condições de ensaio.

Tabela 4.13 – Valores médios e desvio padrão das leituras para o parâmetro de rugosidade Ra dos microcanais usinados a um ap variável.

Tensão de passivação [V]	Tempo de passivação [s]	Velocidade de corte [m/s]	Ra médio [nm]	Desvio Padrão [nm]
2	1	1,35	121	28
		2,00	121	27
		2,65	101	12
	10	1,35	62	9
		2,00	63	8
		2,65	49	6
	20	1,35	125	37
		2,00	72	11
		2,65	65	15
4	1	1,35	88	24
		2,00	18	7
		2,65	18	4
	10	1,35	19	3
		2,00	17	7
		2,65	12	3
	20	1,35	57	19
		2,00	50	8
		2,65	41	9
6	1	1,35	83	15
		2,00	51	9
		2,65	44	9
	10	1,35	60	3
		2,00	61	5
		2,65	46	11
	20	1,35	13	3
		2,00	13	1
		2,65	10	1

O menor valor médio de Ra foi encontrado no microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s e V_w 30 mm/min, equivalente a 10 nm, em uma superfície passivada a uma tensão de 6 V e tempo de aplicação da tensão de 20 s. Fato este que condiz ao obtido para a situação em que os canais foram usinados a um ap constante, indicando que a condição ótima ocorreu ao adotar tais parâmetros de corte e de preparação superficial. Menores valores médios de rugosidade Ra também foram encontrados durante a utilização de tensão elétrica igual a 4 V e tempo de passivação de 10 s, semelhantes aos obtidos na condição ótima, o que difere do encontrado ao

considerar a condição de ap constante. As justificativas desses resultados demandam um maior aprofundamento de análise que não foram foco desse trabalho.

Um ponto importante observado após o processamento dos dados e que deve ser registrado é de que independentemente da realização da operação de passivação superficial anteriormente à microrretificação, os melhores acabamentos em termos de Ra foram alcançados ao ser utilizado maiores V_s . Além disso, maiores valores de tensão de passivação de superfícies de Ti-6Al-4V podem suceder em peças posteriormente usinadas mecanicamente menos rugosas. Quanto ao tempo de ensaio de passivação, não foi possível estimar um comportamento definido frente aos resultados encontrados.

Em relação ao desvio padrão, considerando as medidas realizadas ao longo do crescimento da profundidade de corte nas sub-regiões dos canais microrretificados, não foram encontrados resultados expressivos que demonstrassem uma mudança abrupta no valor de Ra , indicando a possibilidade de não ser a melhor escolha para a realização da análise. Mais da metade dos ensaios forneceram valores menores ou iguais a 9 nm, indicando uma boa repetibilidade das leituras efetuadas. Os maiores valores obtidos se deram durante a utilização da menor V_s (e conseqüentemente menor rotação), a qual já foi comprovada pelos resultados apresentados supracitados fornecer uma qualidade inferior da superfície final usinada.

4.6.2.1 Topografias superficiais e a análise via o software MountainsLab

As imagens topográficas das 9 amostras passivadas contendo os microcanais produzidos ao longo do comprimento da amostra são apresentadas na Fig. 4.71, sendo V a tensão elétrica (2 V, 4 V e 6 V), t o tempo de passivação (1 s, 10 s e 20 s) e a numeração dos canais em 1, 2 e 3 referente às diferentes V_s adotadas, iguais a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, respectivamente. Pela ampliação utilizada na análise, não foram detectadas produções expressivas de rebarbas nas bordas laterais dos canais durante a variação de ap . Em caráter de comprovação, na Figura 4.72 são mostradas imagens em MEV dos microcanais usinados na condição destacada em vermelho, considerando diferentes posições (inicial, central e final) com base no sentido positivo de crescimento de ap , a qual refere-se a um V_w de 30 mm/min e V_s igual a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, em uma superfície passivada à tensão de 4 V e tempo passivação 10 s.

Um caso, porém, é apresentado e discutido no APÊNDICE III. Em resumo, durante o desenvolvimento de um teste anterior à realização dos ensaios definitivos, considerando a superfície passivada a uma tensão de 2 V e tempo de aplicação de 10 s, foi produzido um canal

com rebarbas ressaltadas tanto no lado discordante quanto no concordante, uma situação atípica em processos de microrretificação.

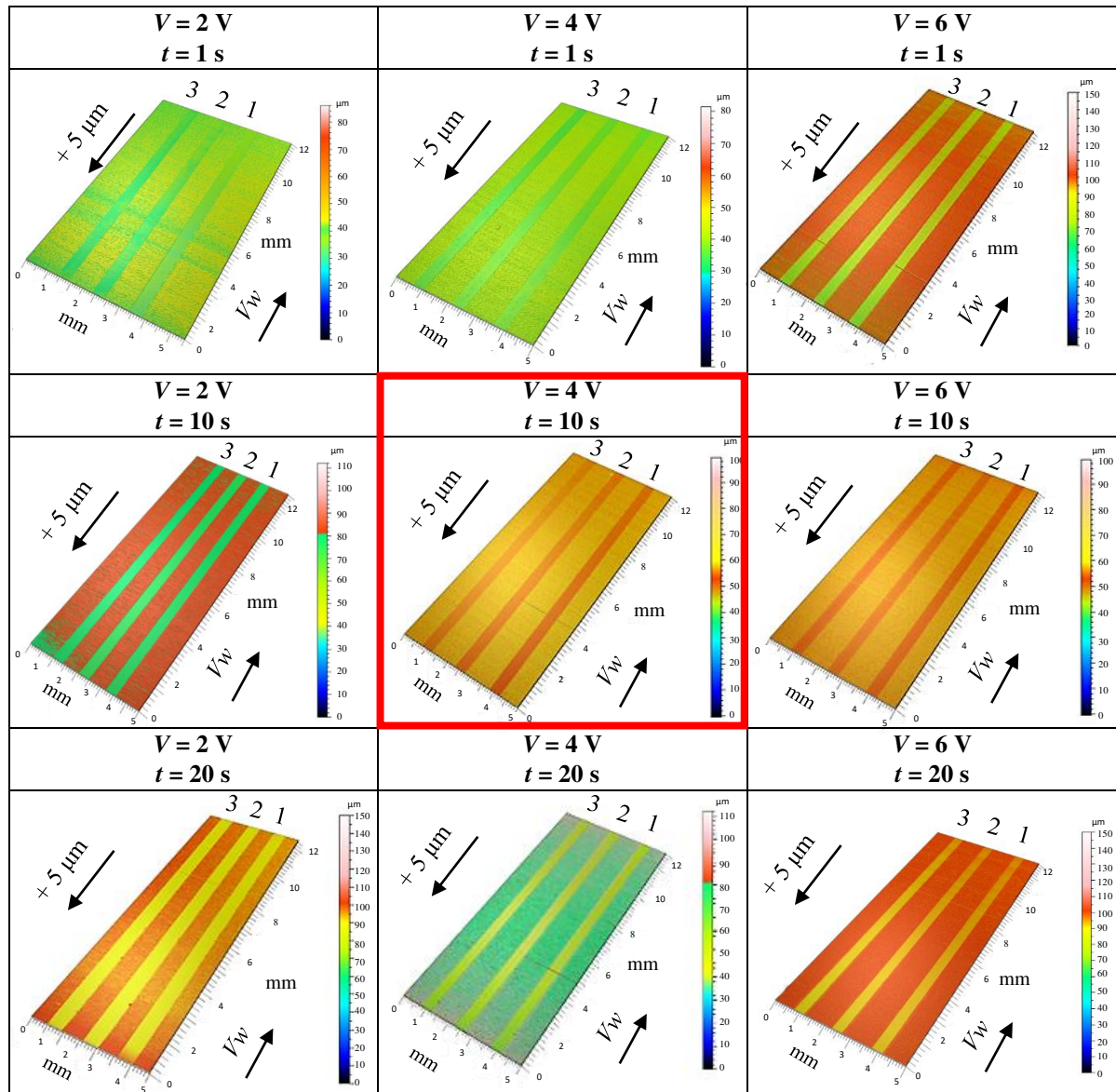


Figura 4.71 - Imagens topográficas dos microcanais fabricados a um a_p variável (até 5 μm) em peças de Ti-6Al-4V passivadas em diferentes condições de tensão (2 V, 4 V e 6 V) e tempo de passivação (1 s, 10 s e 20 s), para um mesmo V_w de 30 mm/min, e as numerações 1, 2 e 3 referente à V_s adotada, igual a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, respectivamente.

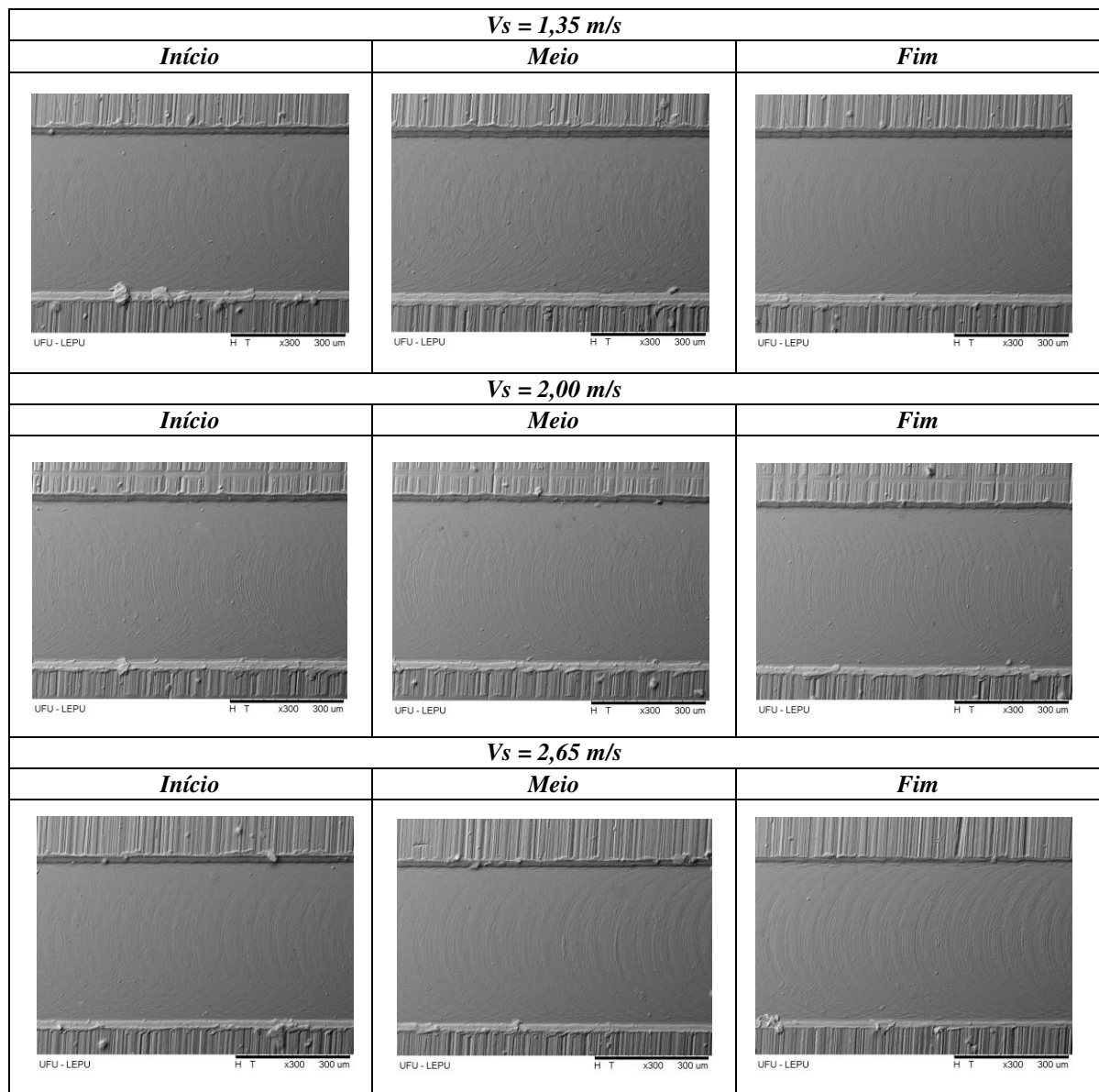


Figura 4.72 - Imagens em MEV dos canais microrretificados a um V_w de 30 mm/min, a_p variável e V_s iguais a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada à tensão de 4 V e tempo passivação 10 s, nas posições de inicial, central e final, para o sentido positivo de crescimento de a_p .

Nas Figuras 4.73, 4.74 e 4.75 são exibidas as análises superficiais de rugosidade, obtidas pela plataforma do *MountainsLab*, dos microcanais microrretificados a um V_w de 30 mm/min, a_p variável e V_s iguais a 1,35 m/s, 2,00 m/s e 2,65 m/s, respectivamente, em uma superfície passivada a uma tensão elétrica de 6 V e tempo de 20 s (peça em que foi obtido o menor R_a). São apresentados o perfil de rugosidade (filtrado) ao longo de todo o comprimento de avaliação e a quantificação dos parâmetros de rugosidade efetuada pelo *software* de medição, os quais

são condizentes com os encontrados durante a medição com o perfilômetro de contato. Os demais resultados são apresentados no APÊNDICE IV.

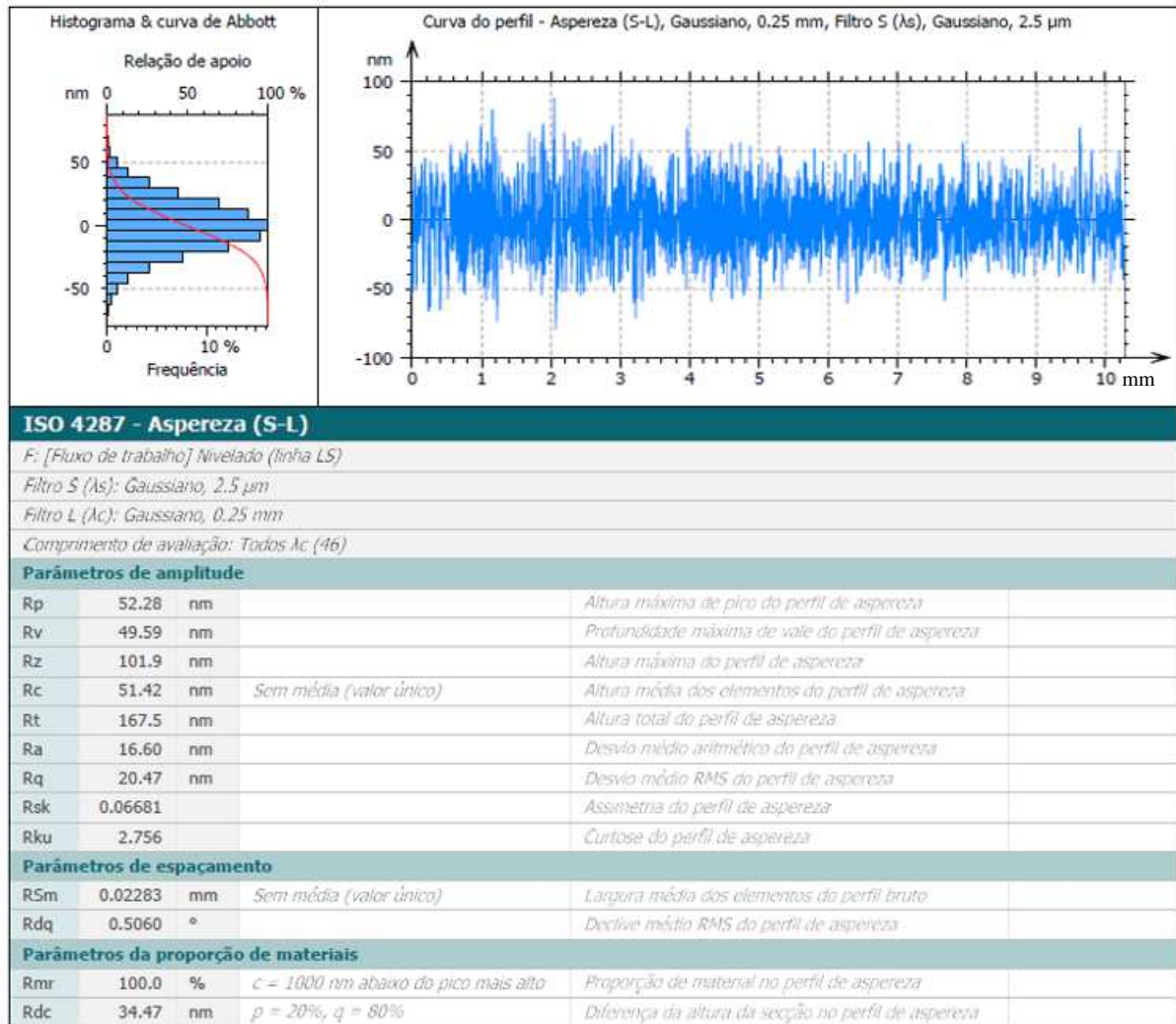


Figura 4.73 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software MountainsLab Premium9 no comprimento total do microcanal usinado a uma V_s de 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.

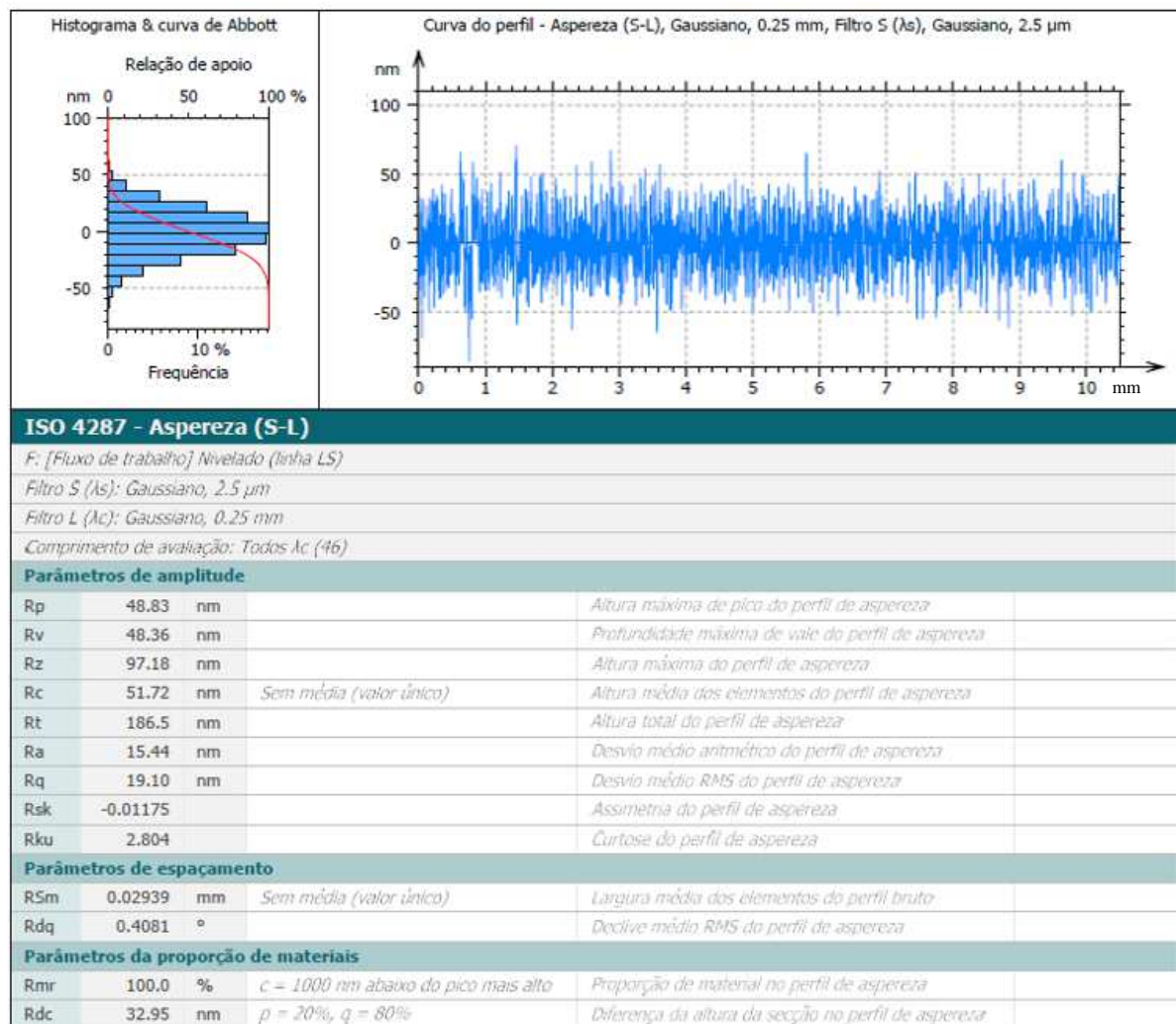


Figura 4.75 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software *MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a uma V_s de 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.

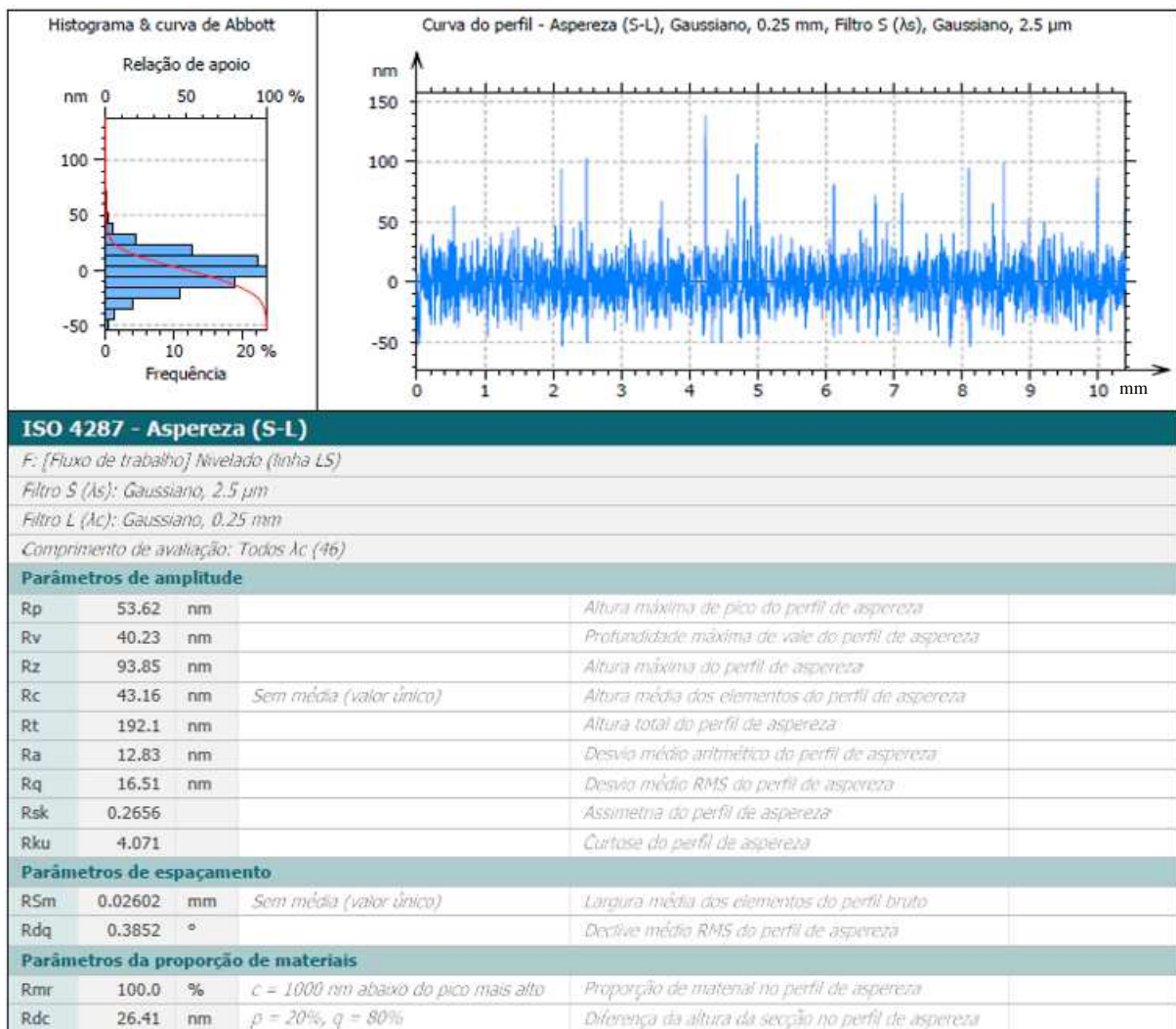


Figura 4.75 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a uma V_s de 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s.

4.6 Análise Final e o Protocolo do Pedido de Patente

Os ensaios híbridos de usinagem transcorreram com a realização dos eletroquímicos em primeira etapa, seguidos, posteriormente à então passivação das superfícies de amostras da liga Ti-6Al-4V, da usinagem mecânica por microrretificação de canais sob as superfícies passivadas.

As análises quantitativas de rugosidade superficial foram positivas e satisfatórias, em que valores na faixa dos 30 nm de rugosidade R_a nos microcanais fabricados em uma superfície

passivada à tensão de 6 V e tempo de passivação de 20 s foram encontrados, comparativamente à fabricação com os mesmos parâmetros de corte (V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p 5 μ m) em superfícies preparadas mecanicamente, garantindo um aprimoramento da qualidade do acabamento em torno de aproximadamente 62 %. A redução também foi significativa ao considerar os demais parâmetros de rugosidade entre a mesma condição de corte comparando a preparação inicial da superfície, estando nas faixas 64 %, 72 %, 78 %, 63 % e 75 %, para Rq , Rz , Rp , Rv e Rt , respectivamente. Com estes resultados, é possível classificar a técnica desenvolvida como de ultraprecisão.

Os resultados frente à qualidade visual dos canais e da manutenção do mecanismo de microcorte, conservando uma agressividade estável do rebolo durante a realização de todos os ensaios planejados, também ressaltam os benefícios ao se considerar a passivação inicial das superfícies da liga Ti-6Al-4V antes de submetidas a ensaios mecânicos de microrretificação.

Essa proposta inovadora foi registrada por meio de depósito de patente de invenção junto ao INPI (BR 10 2022 008125 5) em 28/04/2022. Resumidamente, protege “a técnica que associa a eletroquímica direcionada à passivação da superfície da peça a ser usinada de modo a formar uma camada determinística de subprodutos caracterizada por ser de menor resistência mecânica que o material base original, a qual é relativamente mais fácil de ser removida por ação mecânica devido às menores forças de ligações químicas com o material base. Posteriormente, tem-se a ação mecânica de uma ferramenta de corte, que pode ser de geometria definida monocortante ou multicortante ou de geometria não definida, concentrada na camada passivada produzida. A palavra “posteriormente” supracitada abrange as situações “subseqüentemente à oxidação” e “como etapa secundária à oxidação”. Na primeira, tanto a passivação do material quanto a ação mecânica da ferramenta de corte ocorrem em uma mesma etapa de usinagem, concomitantemente uma à outra. Nesta situação, ressalta-se que o fluxo de eletrólito deve ser impreterivelmente direcionado à área de corte estando associado ao deslocamento do cátodo para evitar que regiões já usinadas sejam novamente passivadas. Na segunda condição, as ações acontecem em momentos distintos, ou seja, primeiramente em uma máquina ou estação de trabalho foca-se exclusivamente na passivação, e depois em um outro equipamento encadeia-se o processo de remoção mecânica da camada passivada”.

Em trabalhos futuros os processos associados e concomitantes serão investigados em uma máquina-ferramenta multiprocessos em desenvolvimento com financiamento da FAPEMIG e do grupo de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos resultados e análises realizadas sobre os processos de microusinagem mecânica abrasiva, eletroquímico e híbrido em amostras da liga Ti-6Al-4V, podem ser inferidas as seguintes conclusões:

- A microrretificação foi beneficiada em termos da qualidade do acabamento nas peças usinadas ao se considerar a eletroquímica como agente modificador da superfície em etapa anterior à realização dos ensaios;

- A obtenção de valores de rugosidade Ra na faixa de 30 nm em amostras de Ti-6Al-4V possibilita a classificação da técnica desenvolvida como de ultraprecisão quanto ao critério de acabamento superficial.

- A microusinagem não está relacionada apenas à redução diametral das ferramentas de corte, de modo que as particularidades de cada processo precisam ser investigadas e entendidas para que sejam obtidos resultados satisfatórios que atendam especificações de tolerâncias dimensionais e geométricas de projeto e viabilizem o controle da qualidade no acabamento superficial das peças usinadas;

- A análise estatística por meio de ANOVA confirmou a significância da velocidade de corte (associada à rotação) e da velocidade de avanço frente aos resultados obtidos de microrretificação. A variação da tensão elétrica de passivação das superfícies metálicas da liga Ti-6Al-4V também produziu resultados estatisticamente significativos;

- A redução, em termos numéricos, para Ra , Rq , Rz , Rp , Rv e Rt em superfícies preparadas eletroquimicamente comparativamente a superfícies preparadas apenas mecanicamente, mantendo-se os demais parâmetros de corte (V_s , V_w e ap) constantes, foi igual a 62 %, 64 %, 72 %, 78 %, 63 % e 75 %, respectivamente;

- A preparação superficial e a fixação das amostras são etapas essenciais para o desenvolvimento de ensaios de usinagem e microusinagem de ultraprecisão, estando relacionadas com a minimização de desvios macrogeométricos que podem afetar negativamente a fabricação de características ou componentes miniaturizados;

- As características de uma ferramenta miniaturizada como geometria e rigidez mecânica afetam significativamente os resultados de rugosidade;

- A utilização de maiores velocidades de corte aliadas à baixas velocidades de avanço se mostrou benéfica para a obtenção de melhores acabamentos superficiais em superfícies microrretificadas;

- A avaliação da integridade estrutural dos microrrebolos após os ensaios de microrretificação detectou como avaria predominante da ferramenta o arrancamento de abrasivos, sendo o desgaste desprezível/não mensurado.

- Os maiores valores de rugosidade encontrados nos microcanais usinados por microrretificação em superfícies preparadas mecanicamente (lixamento) podem estar associados à menor rigidez mecânica da ferramenta, vibrações mecânicas e ao efeito escala;

- Os parâmetros de corte também influenciaram significativamente os resultados de rugosidade, em que valores de V_w (como 5 mm/min e 10 mm/min) e de ap (25 μ m), mostraram-se inviáveis para a microrretificação de canais em peças de Ti-6Al-4V considerando as ferramentas utilizadas;

- Não foi possível prever um comportamento definido entre o incremento da profundidade de corte e os parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rz , Rp , Rv e Rt durante os ensaios mecânicos de microrretificação;

- Os maiores valores de incerteza de medição estiveram associados ao fator da variabilidade das leituras e ocorreram nas condições que apresentaram pior repetibilidade das medições realizadas;

- Foi possível definir um comportamento passivador da liga Ti-6Al-4V por meio de ensaio da curva de polarização do sistema eletrolítico;

- O aumento da tensão elétrica em eletrólitos mais concentrados pode intensificar a agressividade dos ânions cloreto em solução, prejudicando a obtenção de maiores espessuras da camada passivada. Definiu-se a utilização de uma concentração média igual a 5 % NaCl por apresentar uma relação direta entre o crescimento da camada passivada e da tensão elétrica;

- Maiores áreas de passivação somadas a um maior *gap* de usinagem podem ter sido os responsáveis pelos menores resultados de espessura média do filme de óxidos induzido durante o desenvolvimento dos ensaios definitivos eletroquímicos;

- Apesar da profundidade de corte adotada (5 μm) ser de ordem de grandeza expressivamente maior do que a espessura da camada passivada, usinando simultaneamente material base da liga, os resultados dos ensaios híbridos de fabricação considerando a passivação superficial das amostras antes de serem submetidas à microrretificação foram positivos para todos os parâmetros de rugosidade avaliados, em que também se foi observado uma redução na produção de rebarbas ao longo do comprimento dos canais;

- A utilização de maiores valores de tensão elétrica, independentemente do tempo de passivação, resultou em melhores acabamentos superficiais no interior dos microcanais pós-usinagem mecânica;

- A análise estatística por meio de ANOVA mostrou que o tempo de passivação não produziu efeitos estatisticamente significativos em nenhum dos parâmetros de rugosidade avaliados no interior dos microcanais usinados mecanicamente em superfícies passivadas;

- A presença do mecanismo de remoção de material por microcorte foi predominante durante o desenvolvimento de todo planejamento fatorial proposto para microrretificação de canais em superfícies previamente passivadas, indicando uma agressividade constante da ferramenta de corte;

- A microrretificação realizada com um a_p variável não foi capaz de detectar mudanças expressivas do acabamento superficial ao longo do comprimento usinado;

- As imagens topográficas dos microcanais fabricados para um a_p constante e também variável nas superfícies passivadas não apresentaram formações significativas de rebarbas nem no lado concordante e nem no discordante de usinagem.

Como sugestão para trabalhos futuros em uma mesma linha de pesquisa, sugere-se:

- Identificação de um modelo matemático para avaliação da vida da ferramenta de corte;
- Análise dos modos de vibração mecânica experimentado pelas ferramentas de corte miniaturizadas durante a realização dos ensaios mecânicos;
- Análise dos produtos e mecanismos de passivação;
- Substituição do eletrólito de NaCl por NaNO₃ para análise da passivação do material;
- Fabricação própria de microrrebolos prezando por geometrias e materiais que favoreçam a sua rigidez mecânica;
- Aplicar outros abrasivos, ligantes e técnicas de ancoramento dos abrasivos;
- Medição dos esforços de microrretificação;
- Medição da emissão acústica para detectar o contato da ferramenta e monitoramento do processo e mecanismo de remoção de material;
- Aplicar ferramentas de dureza superior à da camada passiva, porém de dureza inferior ao material base;
- Aprimorar o sistema e tecnologia desenvolvidos com vista à inovação tecnológica; e
- Desenvolvimento da usinagem híbrida simultânea entre microrretificação e eletroquímica associando a passivação do material concomitantemente à remoção da camada passivada produzida.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISO 1 - Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento.** 1997, 2p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288 – Especificações geométricas de produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade.** 2008, 10p.

ACHARYA, B. G.; JAIN, V. K.; BATRA, J. L. **Multi-objective optimization of the ECM process.** Butterworth Co (Publishers) Ltd 8/2, 1986, 88-96. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(86\)90091-7](https://doi.org/10.1016/0141-6359(86)90091-7)

ANAND, R. S.; PATRA, K.; STEINER, M. **Size effects in micro drilling of carbon fiber reinforced plastic composite.** Prod Eng Res Devel, 2014. DOI: [10.1007/s11740.014.056.2](https://doi.org/10.1007/s11740.014.056.2)

ANSI STANDARD B 74.12. **Specification for Size of Abrasive Grain.** American National Standards Institute, United States of American, 1977.

ALTING, L.; KIMURA, F.; HANSEN, H.N.; BISSACO, G. **Micro Engineering.** CIRP Annals, 2003, 52/2:635-657. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60208-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60208-X)

ALTINTAS, Y., **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design.** Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

AMZALLAG, C.; LEIS, B.N.; RABBE, P. **Low-cycle fatigue and life prediction**. ASTM STP 770, 1982.

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. **Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel**. Precision Engineering, Philadelphia, v. 33, n. 4, p. 402-407, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002>

ARDILA, M. N. **Influência do Nióbio na Textura e na Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Ferríticos em Ambientes Areados e Desareados**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFU, 2013.

ARRAZOLA, P. J.; GARAY, A.; IRIARTE, L. M.; ARMENDIA, M.; MARYA, S.; MAÎTRE, F. L. **Machinability of Titanium Alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)**. Journal of Materials Processing Technology 209, 2009, 2223-2230. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.020>

ASM HANDBOOK, VOL. 2 - **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1990.

ASSIS, S. L.; COSTA, I. **The Effect of Polarization on the Electrochemical Behavior of Ti-13Nb-13Zr Alloy**. Materials Research, 2007, 293-296. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392007000300014>

ASTM B265-15 **Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM G5-94 **Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004. DOI: [10.1520/G0005-94R04](https://doi.org/10.1520/G0005-94R04)

AURICH, J.C.; ENGMANN, J.; SCHUELER, G.M.; HABERLAND, R. **Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, 2009, 311-314. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.049>

AURICH, J.C.; CARRELLA, M.; WALK, M. **Micro grinding with ultra-small micro pencil grinding tools using an integrated machine tool**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 64, 2015, 325-328. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.011>

BANG, Y.; LEE, K.; OH, S. **5-axis micro milling machine for machining micro parts**. Int J Adv Manuf Technol, 2005, 25: 888. DOI: [10.1007/s00170-003-1950-1](https://doi.org/10.1007/s00170-003-1950-1)

BHATTACHARYYA, B.; DOLOI, B. **Modern Machining Technology: Advanced, Hybrid, Micro Machining and Super Finishing Technology**. Academic Press, 2020. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04195-5>

BHATTACHARYYA, B.; MUNDA, J.; MALAPATI, M. **Advancement in electrochemical micro-machining**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 2004, 1577-1589. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.06.006>

BIANCHI, E.C. **Ação das Condições de Dressagem na Vida de Rebolos na Retificação de Precisão**. Dissertação de Mestrado, EESC - USP, 1990.

BIANCHI, E. C.; MONICI, R. D.; NETO, L. D.; AGUIAR, A. R.; GUERMANDI, L. G. **Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado**. Cerâmica 57, 2011, 431-437. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000400010>

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

BOYER, R. R. **An overview on the use of titanium in the aerospace industry**. Materials Science and Engineering A213, 1996, 103-114. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10233-1](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10233-1)

BRAGA, N. A.; FERREIRA, N. G.; CAIRO, C. A. A. **Obtenção de titânio metálico com porosidade controlada por metalurgia do pó.** *Química Nova*, 30(2), 2007, 450-457. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000200037>

BRINKSMEIER, E. *et al.* **Ultra-precision grinding.** In: CIRP, 59, 2010. Annals of the CIRP - Manufacturing Technology, 2010, p.652-671. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.001>

BUTLER-SMITH, P.W.; AXINTE, D.A.; DAINE, M. **Solid diamond micro-grinding tools: From innovative design to preliminary performance evaluation in Ti-6Al-4V.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 59, 2012, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.03.003>

CAMARA, 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*, p 673-685, 2012. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60115-7](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60115-7)

CHAE J.; PARK S. S.; FREIHEIT T. **Investigation of Micro-Cutting Operations,** *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.46, pp. 313–332, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015>

CHENG, K.; HUO, D. **Micro-Cutting: Fundamentals and Applications.** Wiley, 366 p., 2013.

CHENG, J; GONG, Y.; WANG, J. **Modeling and Evaluating of Surface Roughness Prediction in Micro-grinding on Soda-lime Glass Considering Tool Characterization.** *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 26, No. 6, 2013. DOI:[10.3901/CJME.2013.06.1091](https://doi.org/10.3901/CJME.2013.06.1091)

CHENG, J.; GONG, Y. D. **Experimental Study of Surface Generation and Force modeling in Micro-Grinding of Single Crystal Silicon Considering Crystallographic Effects.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2014, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.10.003>

CRUZ, C.E.D. **Estimação do diâmetro e rugosidade em um processo de furação utilizando multi sensores e redes neurais artificiais**. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2010.

CURTIS D.T.; SOO, S.L.; ASPINWALL, D. K.; SAGE, C. **Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aeroengine alloy using mounted grinding points**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, 2009, 173-176. DOI:[10.1016/j.cirp.2009.03.074](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.074)

DATTA, M. **Anodic Dissolution of metals at high rates**. IBM J Res Develop. Vol 37, 1993.

DE MELLO, A. V. **Retificação da liga Ti-6Al-4V, com fluido de corte contendo partículas de grafeno**. 95f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

DE SILVA, A. K. M.; ALTENA, H. S. J.; MCGEOUGH, J. A. **Influence of Electrolyte Concentration on Copying Accuracy of Precision-ECM**. Annals of the CIRP, Vol.52/1, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60556-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60556-3)

DIN 51 385. Kühlschmierstoff - Begriffe. Berlin, Beuth, 1981.

DING, Z.; LI, B.; FERGANI O.; SHAO, Y.; LIANG, S. Y. **Investigation of Temperature and Energy partition during Maraging Steel Micro-Grinding**. Procedia CIRP, 2016, 284-288. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.084>

DINIZ A. E., MARCONDES F. C., COPPINI N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais**, 1ª edição, 1999, 242p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; LEMOS, N. C. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**, 6ed. São Paulo: Editora Artiber Editora Ltda, 2008. 262p.

DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. **Recent Advances in Mechanical Micromachining**. In: CIRP, 55. Annals of the CIRP – Manufacturing Technology, 2006, p.745-768. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.006>

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.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M. **Titanium alloys and their machinability - a review**. Journal of Materials Processing Technology 68, 1997, 262-274. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00030-1)

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. **An overview of machinability of aeroengine alloys**. Journal of Materials Processing Technology 134, 2003, 233-253. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01042-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01042-7)

FENG, J.; KIM, B.S.; SHIH, A.; NI, J. **Tool wear monitoring for micro-end grinding of ceramic materials**. Journal of Materials Processing Technology 209, 2009, 5110-5116. DOI:[10.1016/j.jmatprotec.2009.02.009](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.02.009)

FENG, J.; CHEN, P.; NI, J. **Prediction of surface generation in microgrinding of ceramic materials by coupled trajectory and finite element analysis**. Finite Elements in Analysis and Design 57, 2012, 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2012.03.002>

FIOCCHI, A. A. **Avanços no desenvolvimento de um processo de acabamento para peças planas submetidas à cinemática de lapidação sobre um rebolo dressado com grau de recobrimento**. 143f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2010.

FIOCCHI, A. A. **Ciência e tecnologia da manufatura de ultraprecisão de cerâmicas avançadas: Lapidoretificação U_d de superfícies planas de zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria**. 327f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

FIOCCHI, A. A.; ANGELO-SANCHEZ, L.E.; LISBOA-FILHO, P. N.; FORTULAN, C. A. **The ultra-precision Up-lap grindind of flat advanced ceramics**. Journal of Materials Processing Technology, v. 231, p. 336-356, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.10.003>

FIOCCHI, A.A., FORTULAN, C.A. & de ANGELO SANCHEZ, L.E. **Ultra-precision face grinding with constant pressure, lapping kinematics, and SiC grinding wheels dressed with overlap factor.** *Int J Adv Manuf Technol* 79, 1531–1543 (2015).
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-6933-5>

GAIKWAD, K. S.; JOSHI, S. S. **Modeling of Material Removal Rate in Micro-ECG Process.** *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008.
<https://doi.org/10.1115/1.2844587>

GAWLAK, G. **Some Problems Connected with Balancing of Grinding Wheels.** *Journal of Engineering for Industry*. Vol 106-233, 1984.

GE, Y. C.; ZHU, Z.; WANG, D.; MA, Z.; ZHU, D. **Study on Material Removal Mechanism of Electrochemical Deep Grinding.** *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 510-519. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.033>

GIESE C. **Verfahrensvergleich EDM/ECM im industriellen Umfeld – Anwendungsgebiete von ECM,** Fachtagung Funkenerosion, RWTH Aachen, 2005.

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>

HASÇALIK, A.; ÇAYDAS, U. **A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V alloy machined by EDM and AECG.** *Journal of Materials Processing Technology* 190, 2007, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.048>

HOFFMEISTER, H.W.; HLAVAC, M. **Truing of micro-grinding wheels by diamond tools.** American Society for Precision Engineering: Annual Meeting, 2006.

HUAIQIAN, B.; JIAWEN, X.; YING, L. **Aviation-oriented Micromachining Technology - Micro-ECM in Pure Water.** *Chinese Journal of Aeronautics* 21, 2008, 455-461.
[https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(08\)60059-X](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(08)60059-X)

INASAKI, I. **Grinding of Hard and Brittle Materials**. CIRP Annals, p 463-471, 1987. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60748-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60748-3)

INASAKI, I. **Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes**. Ultrasonics 36, 1998, 273-281. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00052-8)

INASAKI, I.; MEYER, H. R.; KLOCKE, F.; SHIBATA, J.; SPUR, G.; Tonshoff, H. K.; WOBKER, H. G. **Handbook of Ceramic Grinding & Polishing: Cap 4 - Grinding**. 1999, 190-323.

INASAKI, I.; KARPUSHEWSKI, B.; LEE, H. -S., **Grinding chatter - origin and suppression**. Annals of the CIRP, 50/2: 515-534, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62992-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62992-8)

IVANOV, A.; LESSE, R.; SPIESER, A. **Chapter 6 - MicroElectrochemical Machining**. Micromanufacturing Engineering and Technology, 2015, 121-147.

JACKSON M.J.; HITCHINER M.P. **Abrasive Tools and Bonding Systems**. In: Jackson M., Davim J. (eds) Machining with Abrasives. Springer, Boston, MA, 2011.

JEYKRISHNAN, J.; RAMNATH, DR. B. V.; ELANCHEZHIAN, DR. C.; AKILESH, S. **Optimization of process parameters in Electro-chemical machining (ECM) of D3 die steels using Taguchi technique**. Materials Today: Proceedings 4, 2017, 7884-7891. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.124>

JIANG, X.; GUO, M.; LI, B. **Active Control of High-Frequency Tool-Workpiece Vibration in Micro-Grinding**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. DOI: [10.1007/s00170-017-1015-5](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1015-5)

JIN, Y.; CHENG, J. **Experimental Investigation on Surface Generation Mechanism of Micro-Grinding of Hard Brittle Crystal Materials**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 3953-3965. DOI: [10.1007/s00170-017-0075-x](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0075-x)

JO, C. H.; KIM, H. B.; CHU, C. N. **Micro Electrochemical machining for complex internal micro features**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, 2009, 181-184. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.072>

JORGENSEN, B. R.; SHIN, Y. C. **Dynamics of Machine Tool Spindle/Bearing Systems Under Thermal Growth**. *J. Tribol* 119(4), 1997, 875-882. <https://doi.org/10.1115/1.2833899>

KADIVAR M.; AZARHOUSHANG, B.; SHAMRAY, S.; KRAJNIK, P. **The effect of dressing parameters on micro-grinding of titanium alloy**. Precision Engineering 51, 2018, 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.08.008>

KIM, B. H.; RYE, S. H.; CHOI, D. K.; CHU, C. N. **Micro electrochemical milling**. *J. Micromech. Microeng* 15, 2005, 124-129.

KIM, G.; NI, J.; KOÇ, M. **Modeling of the Size Effects on the Behavior of Metals in Microscale Deformation Processes**. ASME. *J. Manuf. Sci. Eng*, 2006. 129(3): 470-476. DOI:[10.1115/1.2714582](https://doi.org/10.1115/1.2714582)

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2 – Grinding, Honing, Lapping**. RWTH edition, ed. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

KLOCKE F.; KLINK A.; VESELOVAC D.; ASPINWALL, D. K.; SOO, S. L.; SCHMIDT, M.; SCHILP, J.; LEVY, G.; KRUTH, J.P. **Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes**. CIRP Ann-Manuf Techn 2014; 63(2):703-726. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.004>

KOCK, M.; KIRCHNER, V.; SCHUSTER, R. **Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses - a versatile method with lithographical precision**. *Electrochimica Acta* 48, 2003, 3213-3219. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00374-8](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00374-8)

KÖNIG, W. **Tecnologia da fabricação – Retificação, brunimento e lapidação**. Tradução de Walter Lindolfo Weingaertner, 1980.

KOZAK, J.; RAJURKAR, K. P.; WEI, B. **Modelling and Analysis of Pulse Electrochemical Machining (PECM)**. J. Eng. Ind 116(3), 1994, 316-323. <https://doi.org/10.1115/1.2901947>

KOZAK, J.; OCZOS, K.E. **Selected problems of abrasive hybrid machining**. Journal of Materials Processing Technology 109, 2004, 360-366. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00824-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00824-4)

KUNAR, S.; BHATTACHARYYA, B. **Investigation into Fabrication of Microslot Arrays by Electrochemical Micromachining**. Machining Science and Technology, 2019, 629-649. DOI: 10.1080/10910344.2019.1575406

KUMAR, P.; JADHAV, P.; BELDAR M.; JADHAV, D. B.; SAWANT, A. **Review Paper on ECM, PECM and Ultrasonic Assisted PECM**. Materials Today: Proceeding, 2018, 6381-6390. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.249>

KUPPUSWAMY, G. **Wheel Variables in Electrolytic Grinding**, Tribol. Int. 9(1), 1976, 29–32. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(79\)90119-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(79)90119-4)

LAUWERS B.; KLOCKE F.; KLINK A.; TEKKAYA, A. E.; NEUGEBAUER, R., MCINTOSH, D. **Hybrid processes in manufacturing**. CIRP Ann-Manuf Techn 2014; 63(2):561-583. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>

LEESE, R.J.; IVANOV, A. **Electrochemical micromachining: an introduction**. Advances in Mechanical Engineering Vol. 8(1), 2016, 1-13. <https://doi.org/10.1177/1687814015626860>

LI, Y.; GRACEWSKI, S.; FUNKENBUSCH, P.; RUCKMAN, J. **Chatter in Deterministic Microgrinding of Optical Glasses**. Center for Optics Manufacturing and Department of Mechanical Engineering University of Rochester, Rochester/ NY, 1999. <https://doi.org/10.1364/OFT.2000.OMA5>

LI, B.; DING, Z.; XIAO, J.; LIANG, S. Y. **Maraging Steel 3J33 Phase Transformation During Micro-Grinding**. Materials Letters, 2016, 217-220. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.10.162>

LI, H.; GAO, C.; WANG, G.; QU, N.; ZHU, D. **A Study of Electrochemical Machining of Ti-6Al-4V in NaNO₃ solution.** Scientific Reports, 6:35013, 2016. DOI: [10.1038/srep35013](https://doi.org/10.1038/srep35013)

LIU, X.; DEVOR, R.E.; KAPOOR, S.G.; EHMANN, K.F. **The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science,** Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2004, 126/4:666-678. <https://doi.org/10.1115/1.1813469>

LIU, X.; DEVOR, R.E.; KAPOOR, S.G.; JUN M. B. G. **Cutting Mechanisms and their Influence on Dynamic Forces, Vibrations and Stability in Micro-endmilling.** In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2004, Anaheim, CA, Paper No. 62416. <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-62416>

LIU, K.; MELKOTE, S. N. **Finite element analysis on the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process.** International Journal of Mechanical Sciences, p 650-660, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.09.012>

LIU, J.; CHEN, Y.; ZHANG, J.; WU, L.; YANG, Z.; ZHANG, F.; SUN, J.; LIU, X.; JIN, Z.; ZHAO, D. **Atmospheric pressure plasma jet and minimum quantity lubrication assisted micro-grinding of quenched GCr15.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. DOI: [10.1007/s00170-019-04469-5](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04469-5)

LOHRENGEL, M. M.; RATAJ, K. P.; MUNNINGHOFF, T. **Electrochemical Machining - mechanisms of anodic dissolution.** Electrochimica Acta 201, 2016, 348-353. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.12.219>

LUCCA, D. A.; RHORER, R. L.; KOMANDURI, R. **Energy Dissipation in the Ultraprecision Machining of Copper.** CIRP Ann, p 69-72, 1991. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61936-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61936-2)

LUPAK, M.; ZABORSKI, S. **Simulation of energy consumption in electrochemical grinding of hard-to-machine materials.** J Appl Electrochem 2009, 39:101-106. <https://doi.org/10.1007/s10800-008-9639-7>

MAKSOUD, T. M. A.; BROOKS, A. J. **Electrochemical grinding of ceramic form tooling**. *Journal of Materials Processing Technology* 55, 1995, 70-75. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01787-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01787-9)

MALKIN, S. **Grinding technology. Theory and applications of machining with abrasives**. 1989, 1.ed. Chichester: Ellis Norwood Ltd.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. 2008, 2.ed. New York: Industrial Press Inc.

MARINESCU, I. D. *et al.* **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 2007, Wakefield: CRC Press.

MASTER DIAMOND, **Pontas montadas em diamante ou borazon (CNB)**, Disponível em: <http://www.masterdiamond.com.br/pontas-montadas-em-diamante-ou-borazon-cbn-2.html>. Acesso em: agosto/2018.

MASUZAWA, T., **State of the Art of Micromachining**, *CIRP Annals*, 2000, 49/2:473-488. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63451-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63451-9)

MIYASHITA, M. 1st Annual Precision Engineering Conference. North Carolina State University, Raleigh, USA. 1985.

MOGILNIKOV, V.A.; CHMIR, M. Y.; TIMOFEEV, Y. S.; POLUYANOV, V.S. **Diamond-ECM grinding of sintered hard alloys of WC-Ni**. *Procedia CIRP* 42, 2016, p 143-148.

MOTTA-NETO, W. S. **Comparação do efeito do método de medição com contato e sem contato na rugosidade**. 177f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MOTTA-NETO, W.S.; LEAL, J. E. S.; ARANTES, L. J.; ARENCIBIA, R. V. **The effect of stylus tip radius on Ra, Rq, Rp, Rv, and Rt parameters in turned and milled samples**. The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2630-5>

MUKHERJEE, S. K.; KUMAR, S.; SRIVASTAVA, P. K. **Effect of electrolyte on the current-carrying process in electrochemical machining.** ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2007, 1989-1996. <https://doi.org/10.1243%2F09544062JMES355>

NAMBA, Y.; ABE, M.; KOBAYASHI, A. **Ultraprecision Grinding of Optical Glasses to Produce Super-Smooth Surfaces.** CIRP Annals, p 417-420, 1993.
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62475-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62475-5)

NOVAKOV, T.; JACKSON, M. J. **Chatter problems in micro- and macrocutting operations, existing models, and influential parameters – a review.** Int J Adv Manuf Technol. P 597-620, 2009. DOI:[10.1007/s00170-009-2213-6](https://doi.org/10.1007/s00170-009-2213-6)

OHMORI, H. **Electrolytic In-Process Dressing (ELID) Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining.** Journal of the Japan Society for Precision Engineering 59, 1993, 1451-1457. <https://doi.org/10.2493/jjspe.59.1451>

OHMORI, H.; NAKAGAWA, T. **Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID (Electrolytic In-Process Dressing) Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels.** In: CIRP, 44. Cirp Annals –Manufacturing Technology, 1995, p.287-290. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62327-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62327-0)

OHNISHI O. *et al.* **Handbook of ceramics grinding and polishing: chapter 4 - grinding.** Oxford: William Andrew Publishing; 2015.

OKAZAKI Y.; MISHIMA N.; ASHIDA K. **Microfactory-concept, history, and developments.** Journal of Manufacturing Science and Engineering 126, 2004, 837–844.
<https://doi.org/10.1115/1.1823491>

OLIVEIRA, J.F.G. **Análise da ação do macroefeito de dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação.** 271f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 1988.

OLIVEIRA, J.F.G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação.** Publicação 048/89 da Escola de Engenharia de São Carlos-SP, 1989.

OLIVEIRA, J. F. G. **Monitoramento de Operações de Retificação de Precisão.** Apresentado em Concurso para Professor Titular – SEM-EESC-USP, 1995, São Carlos-SP.

OLIVERA, F. B.; RODRIGUES, A. R.; MOREIRA, S. R.; GALLEGOS, J.; BATISTA, M. F. **Effects of Micromilling on microhardness and specific cutting energy of ABNT 1045 Steel.** 22nd International Congress of Mechanical Engineering, 2013.

OLIVEIRA, F. B.; RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T.; SOUZA, A. F. **Size effect and minimum chip thickness in micromilling.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, p 39-54, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001>

ONWUKA, G.; ABOU-EL-HOSSEIN, K. **Surface roughness in ultra-high precision grinding of BK7.** Procedia CIRP 45, 2016, 143-146. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.023>

ORYNSKI, F.; PAWLOWSKI, W. **The influence of grinding process on forced vibration damping in headstock of grinding wheel of cylindrical grinder.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, 1999, 229 - 235. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00023-6)

PARK, H. W. **Development of Micro-Grinding Mechanics and Machine Tools.** 184f. Dissertation (Doctorate) – Georgia Institute of Technology, 2008.

PARK, H. W.; LIANG, S. Y. **Force modeling of micro-grinding incorporating crystallographic effects.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, 2008, 1658-1667. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.07.004>

PARK, H. K.; ONIKURA, H.; OHNISHI, O.; SHARIFUDDIN, A. **Development of micro-diamond tools through electroless composite plating and investigation into micro-machining characteristics.** Precision Engineering Vol 34, p 376-386, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2009.09.001>

PASKO, R.; PRZYBYLSKI, L.; SLODKI, B. **High Speed Machining (HSM) - The Effective Way of Modern Cutting.** International Workshop CA Systems and Technologies, 2002.

PILJEK, P.; KERAN, Z.; MATH, M. **Micromachining - Review of Literature from 1980 to 2010.** Interdisciplinary Description of Complex Systems 12(1), 1-27, 2014. <https://doi.org/10.7906>

PRATAP, A.; PATRA, K.; DYAKONOV, A. A. **Manufacturing Miniature Products by Micro-grinding: a Review.** Procedia Engineering 150, 2016, 969-974. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.072>

PRATAP, A.; PATRA, K.; DYAKONOV, A. A. **A Comprehensive Review of Micro-Grinding: Emphasis on Toolings, Performance Analysis, Modeling Techniques, and Future Research Directions.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. DOI:[10.1007/s00170-019-03831-x](https://doi.org/10.1007/s00170-019-03831-x)

QU, N. S.; FANG, X. L.; ZHANG, Y. D.; ZHU, D. **Enhancement of surface roughness in electrochemical machining of Ti6Al4V by pulsating electrolyte.** International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2013, 2703-2709. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5238-9>

QU, N. S.; ZHANG, Q. L.; FANG, X.L.; YE, E.K.; ZHU, D. **Experimental Investigation on Electrochemical Grinding of Inconel 718.** Procedia CIRP 35, 2015, 16-19. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.055>

RAHMAN, M.; WONG, Y. S.; ZAREENA, A. R. **Machinability of Titanium Alloys**. ISME International Journal, 2003, 107-115. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.107>

RAI, R. B.; MUKHOPADHYAY, M.; KUNDU, P. K. **Evaluating the grinding ratio and surface quality of Ti-6Al-4V under varying grinding pass count and depth of cut**. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019. DOI: [10.1088/1742-6596/1240/1/012143](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012143)

RAJURKAR, K. P.; ZHU, D.; MCGEOUGH, J. A.; KOZAK, J.; De SILVA, A. **New Developments in Electro-Chemical Machining**, CIRP Ann. 48(2), 1999, 567–579. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63235-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63235-1)

RAJURKAR, K. P.; SUNDARAM, M. M.; MALSHE, A. P. **Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining**. Procedia CIRP 6, 2013, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.002>

RAZALI, A. R.; QIN, Y. **A Review on Micro-manufacturing, Micro-forming and their Key Issues**. Procedia Engineering 53, 2013, 665-672. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.086>

RODRIGUES A.R., JASINEVICIUS R.G. RG. **Machining scale: Workpiece grain size and surface integrity in micro end milling**. In: Microfabrication and Precision Engineering 27-68, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-485-8.00002-4>.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**, 2009.

RUSZAJ, A. **Electrochemical machining - state of the art and direction of development**. MECHANIK NR: 12/2017. DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.188>.

RUSZAJ, A.; CYGNAR, M.; GRABOWSKI, M. **The State of the Art in Electrochemical Machining Process Modeling and Applications**. AIP Conference Proceedings, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5056292>

SADEGHI, M. H.; HADAD, M. J.; TAWAKOLI, T.; EMAMI, M. **Minimal quantity lubrication- MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 44, p. 487-500, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1857-y>

SALEH, T.; RAHMAN, M. **Electrolytic in-Process Dressing (ELID) Grinding for Nano-Surface Generation.** Comprehensive Materials Processing, 2014, 483-522. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01112-2>

SAPRE, P.; MALL, A.; JOSHI, S.S. **Analysis of Electrolytic Flow Effects in Micro-Electrochemical Grinding.** J Manuf Sci E-T ASME 2013; 135(1):011012. DOI: [10.1115/1.4023266](https://doi.org/10.1115/1.4023266)

SAXENA, K.K; QIAN, J.; REYNAERTS, D. **A review on process capabilities of electrochemical micromachining and its hybrid variants.** International Journal of Machine Tools and Manufacture 127, 2018, 28-56. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.314>

SETTI, D.; SINHA, M. K.; GHOSH, S.; RAO, P.V. **Performance evaluation of Ti-6Al-4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol.88, p. 237-248, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.ijmachtools.2014.10.005>

SHAW, M.C. **Precision Finishing.** In: CIRP, 44. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 1995, p.343-348. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62339-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62339-7)

SHAW, M.C. **Principles of Abrasive Processing.** 1996, Oxford: Clarendon Press.

SILVA NETO, J. C.; DA SILVA, E. M.; DA SILVA, M. B. **Intervening variables in electrochemical machining.** Journal of Materials Processing Technology 179, 2006, 92-96. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jmatprotec.2006.03.105>

SINHOF, V.R. **Feinbearbeitung optischer Gläser in der Kleinserie.** PhD Thesis – Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1997.

SOPELTZEV, A. V.; DYAKONOV, A. A.; KARALI, P. **Dynamic model of material deforming under Microgrinding**. Procedia Engineering 129, 2015, 127-133. DOI: [10.1016/j.proeng.2015.12.020](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.020)

SPECK, K. M.; FRAKER, A. C **Anodic Polarization Behavior of Ti-Ni and Ti-6Al-4V in Simulated Physiological Solutions**. J Dent Res 59(10): 1590-1595, 1980. <https://doi.org/10.1177%2F00220345800590100601>

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. **Material Removal Mechanisms in Precision Machining Materials**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, 2001, 1831-1843. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00014-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00014-1)

STEPHENSON, D. J.; VESELOVAC, D.; MANLEY, S.; CORBETT, J. **Ultra-precision grinding of hard steels**. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology 25, 2001, 336-345. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(01)00087-3)

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SUN S.; BRANDT, M.; DARGUSH, M.S. **Characteristics of cutting forces and chip formation in machining titanium alloys**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49, 2009, 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.02.008>

TAK, M; MOTE, R. G. **Anodic Dissolution Behavior of Passive Layer During Hybrid Electrochemical Micromachining of Ti6Al4V in NaNO₃ Solution**. Journal of Micro- and Nano-Manufacturing, 2021. DOI: [10.1115/1.4052327](https://doi.org/10.1115/1.4052327)

TAYLOR HOBSON, **Rugosímetro “Semi-portátil” Form Talysurf INTRA**, Disponível em: https://taylorhobson.es/dt_portfolio/form-talysurf-intra/. Acesso em: novembro/2018.

TAMINIAU, D. A.; DAUTZENBERG, J. H. **Bluntness of the Tool and Process Forces in High-Precision Cutting**. CIRP Ann, p 65-68, 1991.

THORTON, P. A.; COLANGELO, V. J. **Fundamentals of Engineering Materials**. Prentice Hall. 1985.

THOMAZELLA, R.; LOPES, W. N. AGUIAR, P. R.; ALEXANDRE, F. A.; FIOCCHI, A. A.; BIANCHI, E. C. **Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals**. Measurement, p 71-83, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.079>

TÖNSHOFF, H. K.; FRIEMUTH, T.; BECKER, Jc C. **Process monitoring in grinding**. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 51, n. 2, p. 551-571, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61700-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61700-4)

UHLMANN, E.; MULLANY, B.; BIERMANN, D.; RAJURKAR, K. P.; HAUSOTTE, T.; BRINKSMEIER, E. **Process chains for high-precision components with micro-scale features**. CIRP Annals, 2016, 65(2), 549-572. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.001>

UTTARWAR, S. S.; CHOPDE, DR. I. K. **A Study of Influence on Electrochemical Process Parameters on the Material Removal Rate and Surface Roughness of SS AISI 304**. International Journal of Computational Engineering Research, 2013.

VELTEN, D.; BIEHL, V. AUBERTIN, F.; VALESKE, B.; POSSART, W.; BREME, J. **Preparation of TiO₂ layers on cp-Ti and Ti6Al4V by thermal and anodic oxidation and by sol-gel coating techniques and their characterization**. J Biomed Mater Res, 2001. DOI: [10.1002/jbm.1212](https://doi.org/10.1002/jbm.1212)

VENKATESH, V.; SWAIN, N.; SRINIVAS, G.; KUMAR, P.; BARSHILIA H.C. **Review of the Machining Characteristics and Research Prospects of Conventional Micro-Scale Machining Operations**. Materials and Manufacturing Processes, 2016. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1151045>

WANG, J. P. **Avaliação da retificação com rebolo de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho**. 123f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

WEN, X.; GONG, Y. **Modeling and prediction research on wear of electroplate diamond micro-grinding tool in soda lime glass grinding.** Int J Adv Manuf Technol 91: 3467, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-9992-y>

WENFENG D.; LINKE, B.; YEJUN Z.; ZHENG, L.; YUCAN, F.; HONGHUA, S.; JIUHUA, X. **Review on Monolayer CBN Superabrasive Wheels for Grinding Metallic Materials.** Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 109-134. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.07.003>

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of Surface Metrology.** Leicester - England. 1994.

WIERCIGROCH, M.; BUDAK, E. **Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting.** The Royal Society, 2001, 663-693. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0750>

XU, Z.; CHENG, X.; ZHOU, Z.; QIN, P.; ZHU, D. **Electrochemical Machining of High-Temperature Titanium Alloy Ti60.** Procedia CIRP, 2016, 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.206>

XUEZHEN, C.; ZHENGYANG, Z.; DONG, Z.; ZHONGDONG, F.; DI, Z. **Experimental research on electrochemical machining of titanium alloy Ti60 for a blisk.** Chinese Journal of Aeronautics, 2016, p 274-282.

YA-DONG, G.; YIN, L.; YAO, S.; XUE-LONG, W.; QIANG, L.; SHUO-SHUO, Q.; MING, C. **Experimental and Emulational Investigations into Grinding Characteristics of Zr-based Bulk Metallic Glass (BMG) using Microgrinding.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 3431-3451. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2212-6>

YIN, L.; YA-DONG, G.; HUAN, Z.; YAO, S.; MING, C. **Experimental Investigations into Grinding Characteristics of High Entropy Alloys (HEAs) Using Micro Grinding.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 4477-4499. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1726-2>

ZABORSKI, S.; LUPAK, M.; POROS, D. **Wear of cathode in abrasive electrochemical grinding of hardly machined materials**. Journal of Materials Processing Technology 149, 2004, 414-418. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.015>

ZANGARI, G. **Encyclopedia of Interfacial Chemistry - Fundamentals of Electrodeposition**. p 141-160, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11700-7>

ZHAO, Q.; GUO, B. **Ultra-precision grinding of optical glasses using mono-layer nickel electroplated coarse-grained diamond wheels. Part 1: ELID assisted precision conditioning of grinding wheels**. Precision Engineering 39, 2015, 56-66. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2014.07.006](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.07.006)

ZHOU, Y.; MA, L.; GONG, Y.; ZHANG, L.; YIN, G.; SUN, Y. **Study on the mechanism of chip forming and the microhardness of micro-grinding nickel-based singles-crystal superalloy**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. DOI: [10.1007/s00170-019-03503-w](https://doi.org/10.1007/s00170-019-03503-w)

ZHU D.; ZENG, Y.B.; XU, Z.Y.; ZHANG, X.Y. **Precision machining of small holes by the hybrid process of electrochemical removal and grinding**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60, 2011, 247-250. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.130>

ZIBEROV, M.; SILVA, M. B.; JACKSON, M. J.; HUNG, W. N. P. **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>

ZUM, K.H.G. **Grundlagen des Verschleißes. VDI Berichte Nr. 600.3: Metallische und Nichtmetallische Werkstoffe und ihre Verarbeitungsverfahren im Vergleich**, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987.

CAPÍTULO VII

APÊNDICE

I - Programa CNC de referenciamento do microrrebolo

G91

G01 X0 Y0 Z0 F30

G01 Z-0.001

G01 X-20

G01 Z2 F250

G01 X0

G01 Z-0.001

M00

Uma explicação resumida do programa é dada por, considerando o cabeçote da minimáquina já em rotação:

- Definição do zero máquina para os eixos X, Y e Z, considerando a posição da peça;
- Deslocamento de 1 μm no sentido negativo do eixo Z (em direção à peça);
- Movimentação no sentido negativo de X (em direção à peça) de modo a percorrer um comprimento de 20 mm, garantindo ser ultrapassado todo o comprimento da peça durante a usinagem, a um avanço de 30 mm/min;
- Deslocamento de 2 mm no sentido positivo de Z de modo a afastar a ferramenta com segurança da peça, e retornando-a à posição inicial de Z – 1 μm a um avanço de 250 mm/min;

Conferia-se a produção de marcas sobre a superfície, indicativo do contato entre o rebolo e a peça. Caso afirmativo, o procedimento se encerrava e eram configuradas as condições para os ensaios de microrretificação. Caso contrário, zerava-se o eixo Z e o procedimento se repetia até que o contato fosse adquirido.

II - Ensaio para determinação da curva de polarização

Na Figura 7.1 é apresentada a amostra da liga Ti-6Al-4V preparada para o ensaio de polarização, na qual foi efetuado o lixamento das superfícies, de modo que o entorno da peça foi vedado com cera mel e a parte superior com esmalte base incolor para isolamento elétrico da região, em que uma área de 0,5 cm² foi deixada exposta para o ataque eletroquímico. Na parte traseira da peça, antes da vedação com a cera, foi posicionado um cabo elétrico para garantir a conexão com o potenciostato (fonte de tensão), recoberto por tinta prata (condutora de eletricidade).

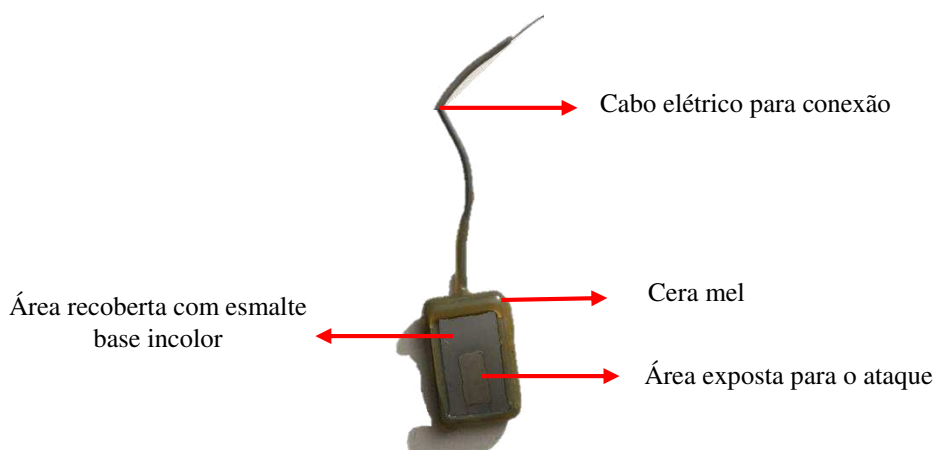


Figura. 7.1 - Amostra de Ti-6Al-4V após preparação para desenvolvimento do ensaio de polarização, destacando o fio elétrico fixado na face traseira da peça para conexão com o potenciostato, a área exposta para o ataque eletroquímico e o isolamento elétrico das demais regiões com cera mel e base incolor.

Nas Figuras 7.2a e 7.2b são mostradas a montagem real do sistema para realização do ensaio de determinação da curva de polarização, mostrando, respectivamente, o reservatório utilizado como cuba eletrolítica de proteção para o ensaio de polarização do sistema eletrólito-metal e uma vista superior destacando o posicionamento e a fixação dos eletrodos no interior do mesmo. Conectores elétricos foram utilizados para garantir a conexão entre o potenciostato e os eletrodos em suas respectivas posições no equipamento.

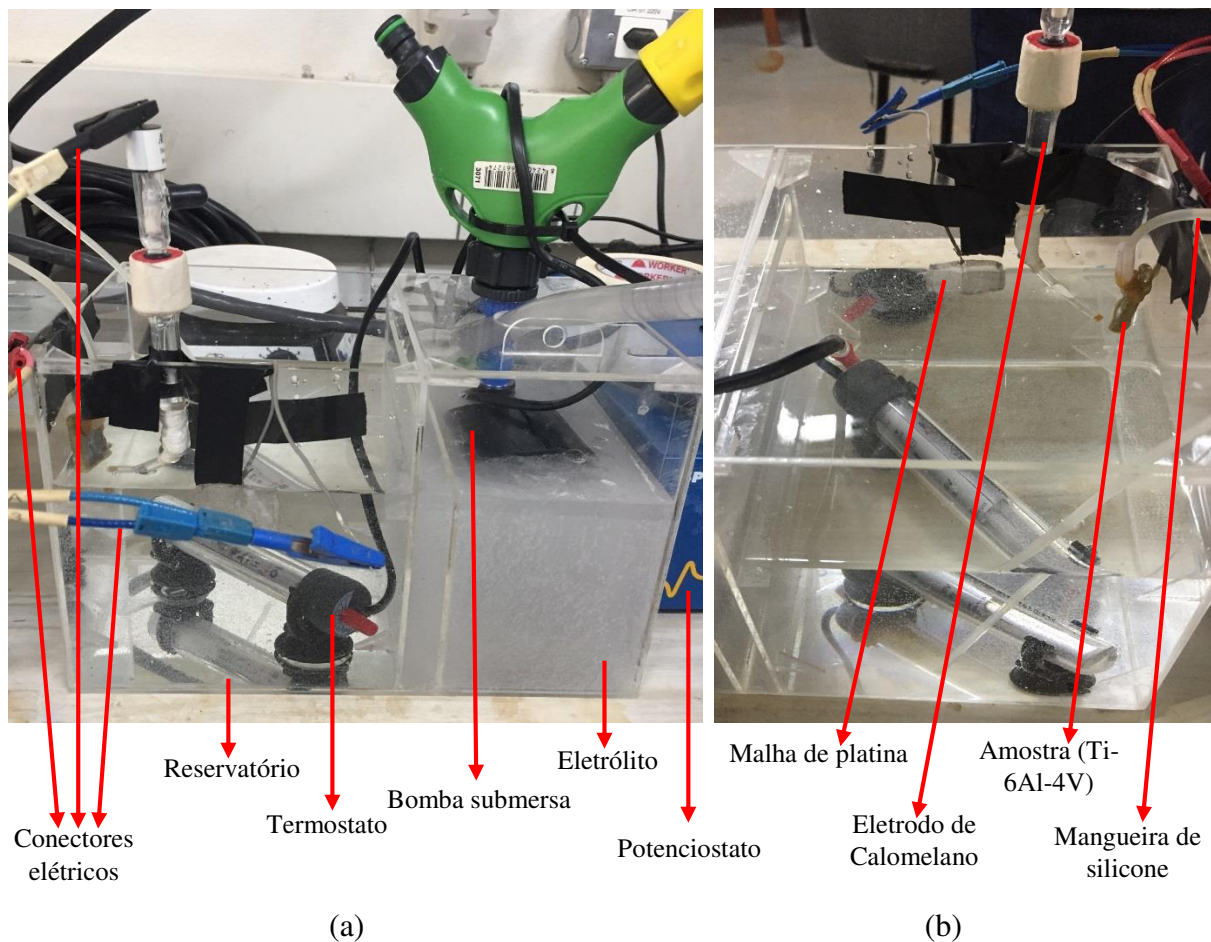


Figura 7.2 - Em (a) vista frontal do reservatório utilizado como cuba eletrolítica para realização do ensaio de polarização e em (b) vista superior representando o posicionamento dos eletrodos no interior do reservatório, destacando os componentes do sistema montado.

III - Ensaio preliminar de microrretificação em uma superfície passivada com formação atípica de rebarbas nas bordas do canal.

Na Figura 7.3 é apresentada a topografia superficial e as respectivas imagens em MEV de um microcanal fabricado sobre uma superfície passivada à tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s, e os parâmetros de corte iguais a $V_w = 30$ mm/min, $a_p = 5$ μ m e $V_s = 1,35$ m/s. Note que a partir de uma determinada posição de usinagem (em torno de 3 mm), inicia-se uma produção de rebarbas laterais nos lados discordante e concordante ao longo da passagem do microrrebolo sobre a superfície do material, caracterizando uma situação atípica em processos abrasivos de microrretificação, em que uma das vantagens está na minimização da formação de rebarbas.

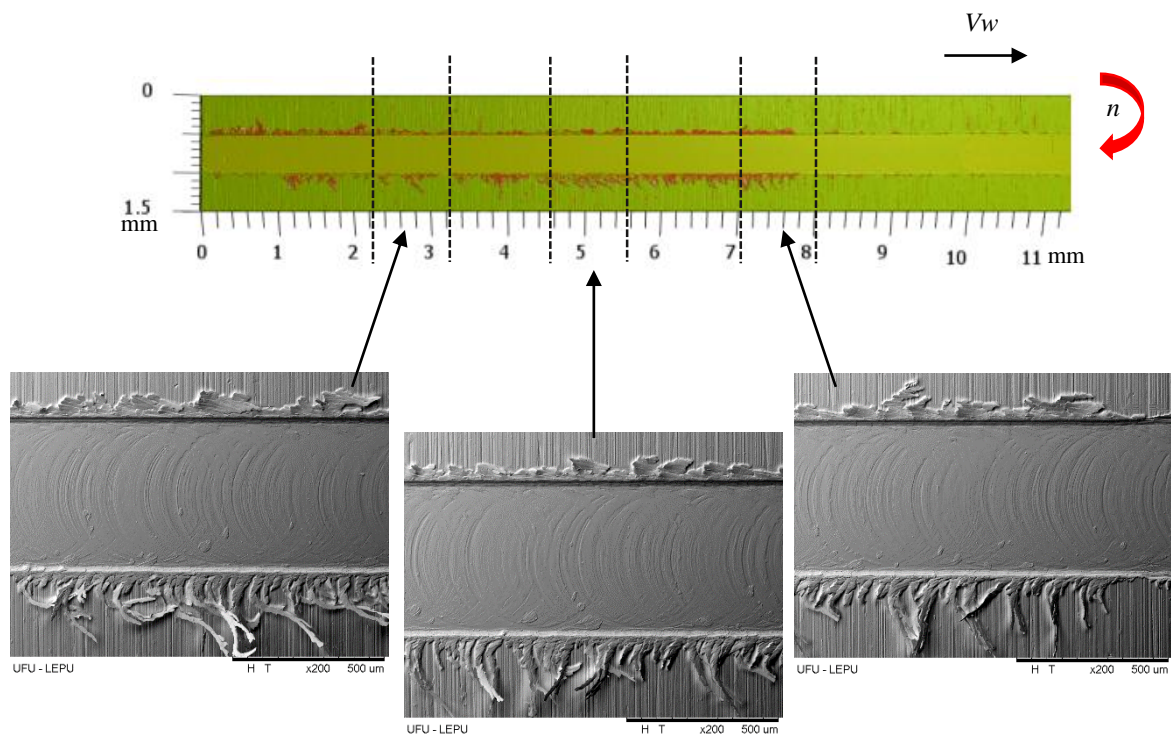


Figura 7.3 – Topografia superficial e imagens em MEV de um canal microrretificado considerando os parâmetros de corte V_w igual a 30 mm/min, a_p igual a 5 μ m e V_s de 1,35 m/s, sob uma superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão 2 V e tempo de passivação de 10 s, destacando a formação de rebarbas nos lados discordante e concordante de usinagem.

Embora as mesmas condições de usinagem durante a fabricação do microcanal tenham sido utilizadas em outros ensaios e transcorridos com uma produção mínima de rebarbas, neste

caso em específico, as mesmas alcançaram comprimentos na faixa de 270 μm . Tal fato pode estar associado à combinação entre a utilização de uma menor V_s e fim de vida do microrrebolo, o qual já vinha sendo utilizado em testes anteriores e que foi substituído para o desenvolvimento dos ensaios definitivos. A seção inicial da peça em que não há uma produção significativa de rebarbas refere-se à região em que foi realizado o referenciamento da ferramenta, em que a profundidade de corte mantinha-se próxima de 0 micrometros. Com o desnivelamento da peça e o deslocamento da mesa da minimáquina na direção de V_w , o microrrebolo passou a entrar em contato efetivo com a superfície do material a uma profundidade de corte variável. Nesse momento, a condição desfavorável da ferramenta, aliada à baixa rotação e ainda baixa usinabilidade da liga de titânio, resultou em um corte instável e ineficiente, produzindo rebarbas espessas e de longo comprimento, prejudicando a qualidade do acabamento final da superfície.

IV - Análises superficiais realizadas pelo *software MountainsLab Premium 9* no interior de canais (no fundo dos canais) microrretificados em superfícies passivadas.

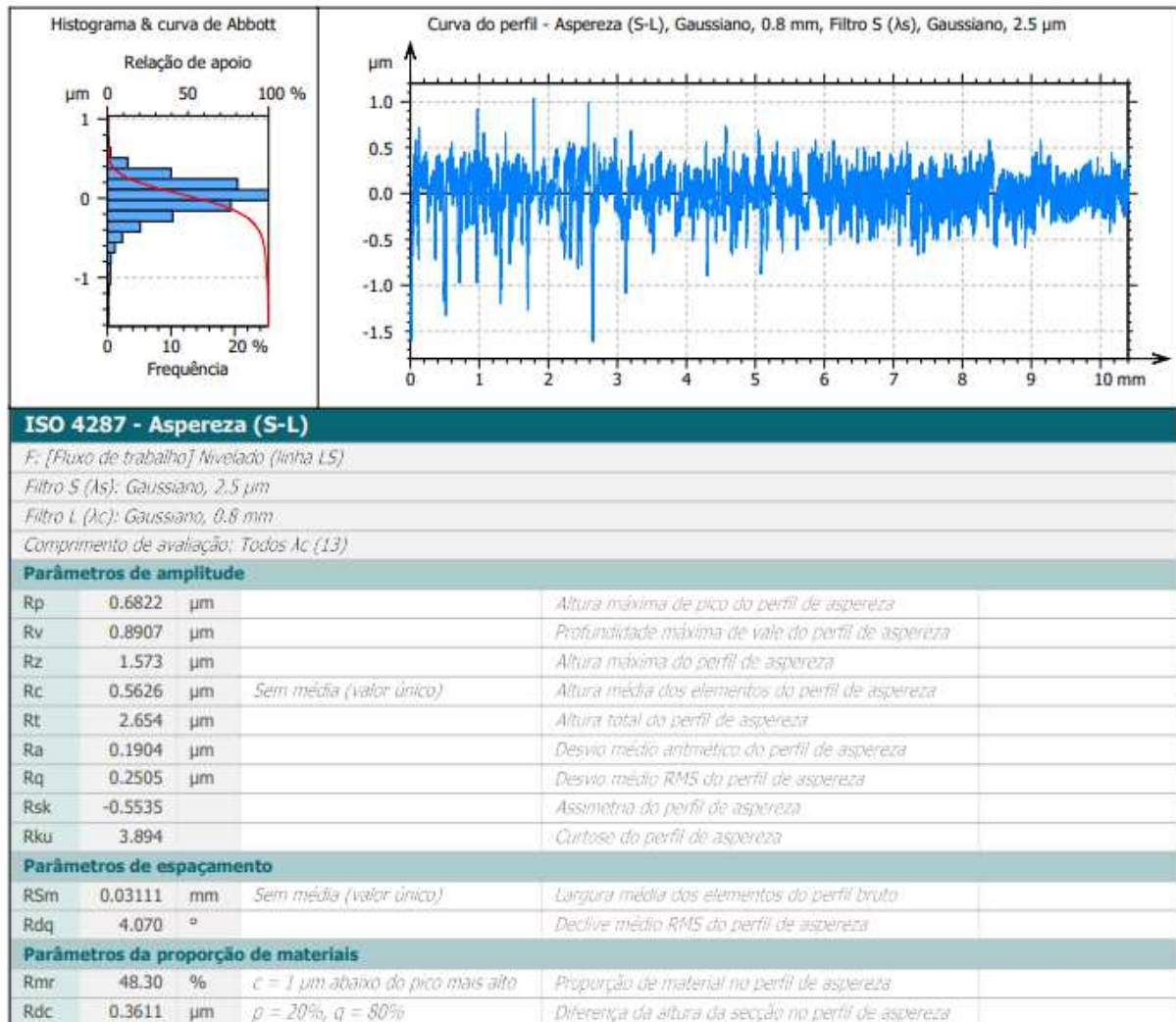


Figura 7.4 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s.

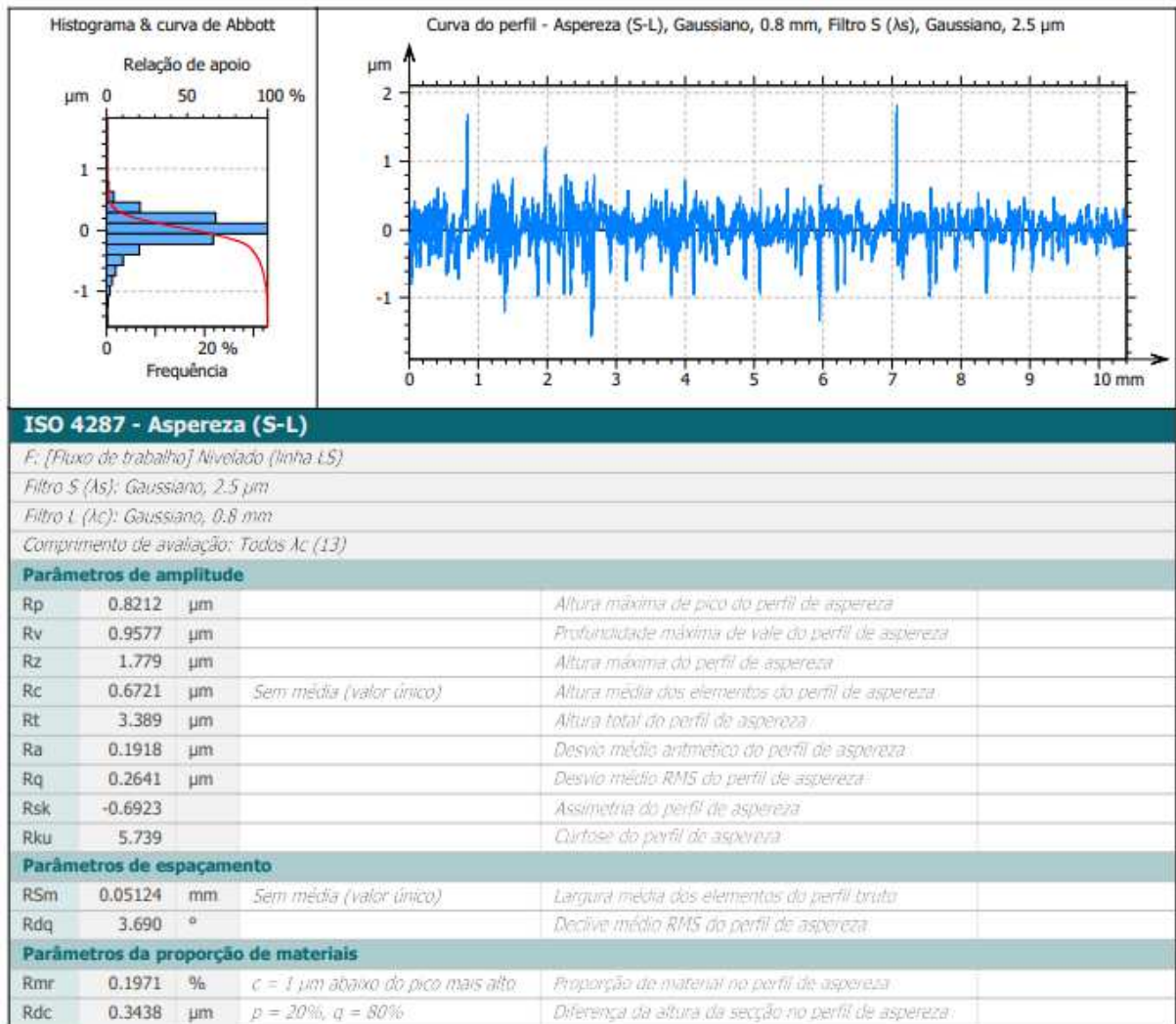


Figura 7.5 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s.

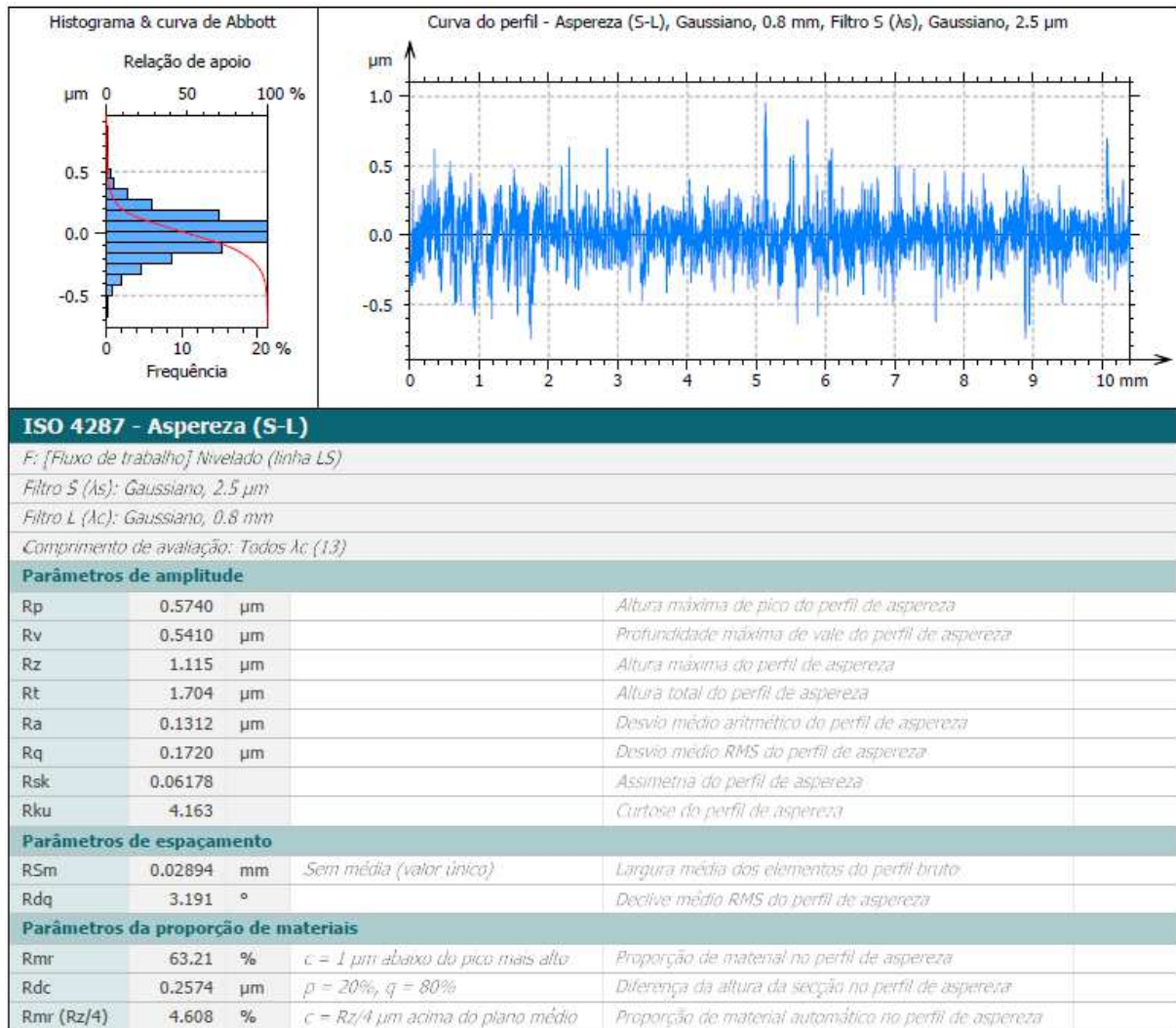


Figura 7.6 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 1 s.

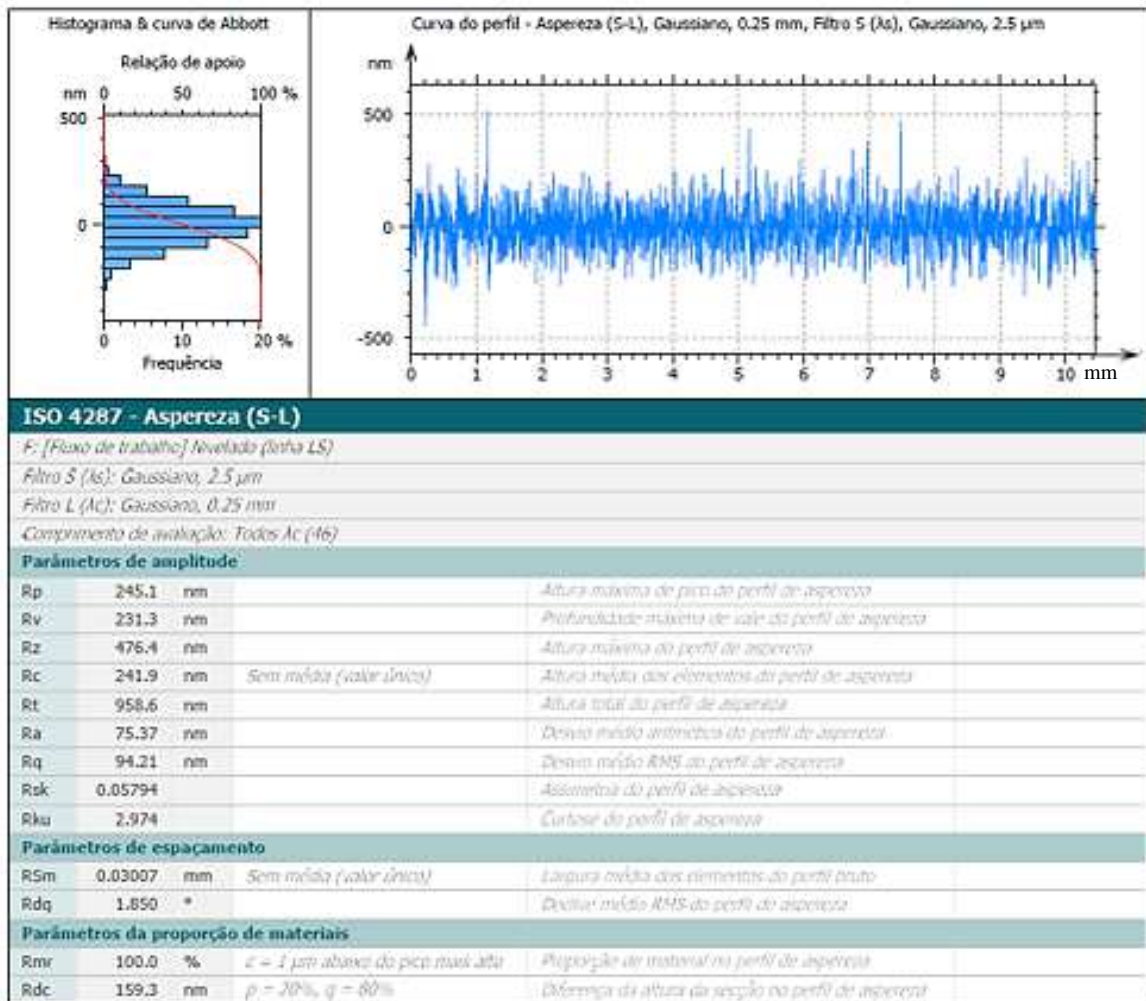


Figura 7.7 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s.

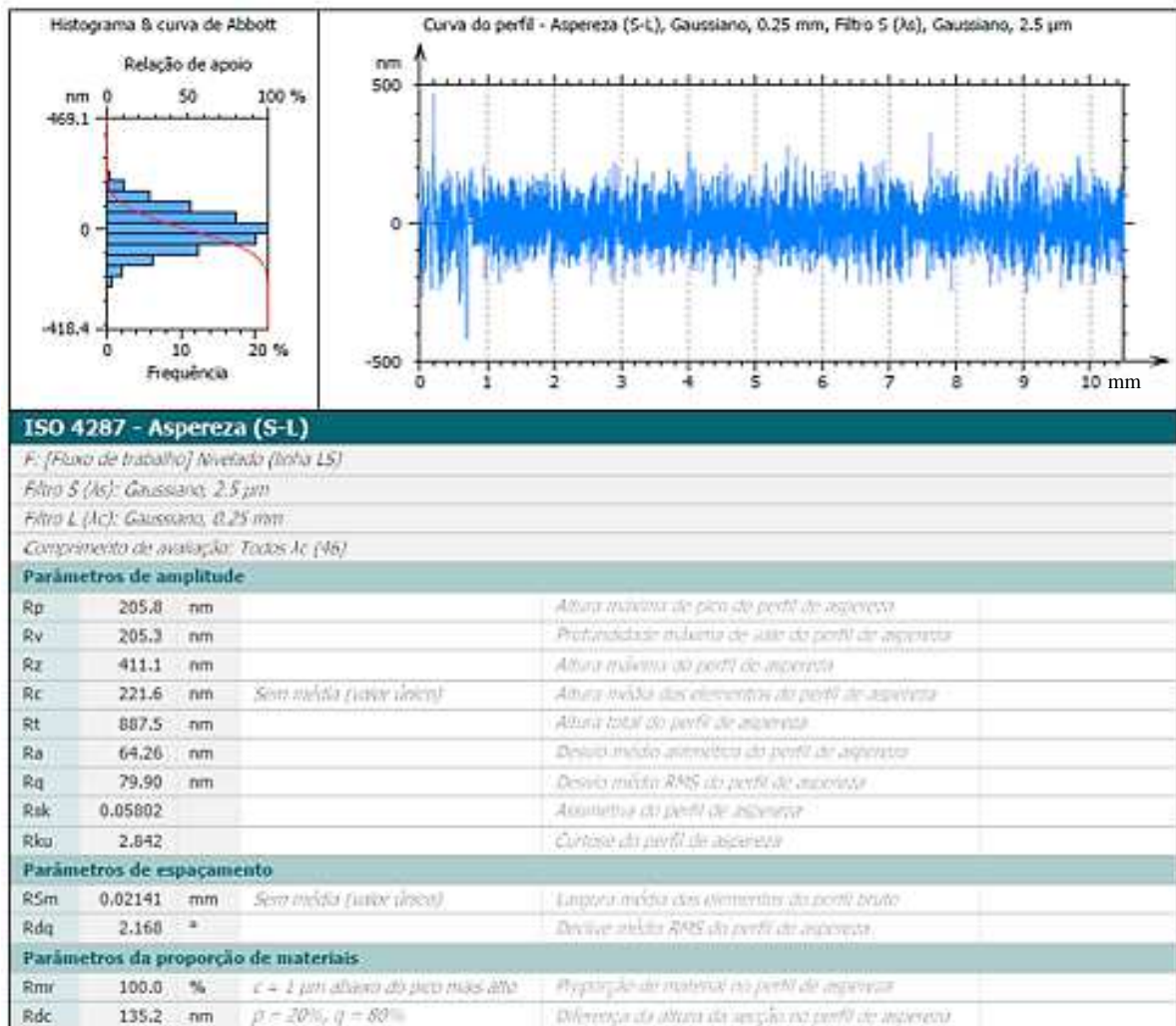


Figura 7.8 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software MountainsLab Premium9 no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s.

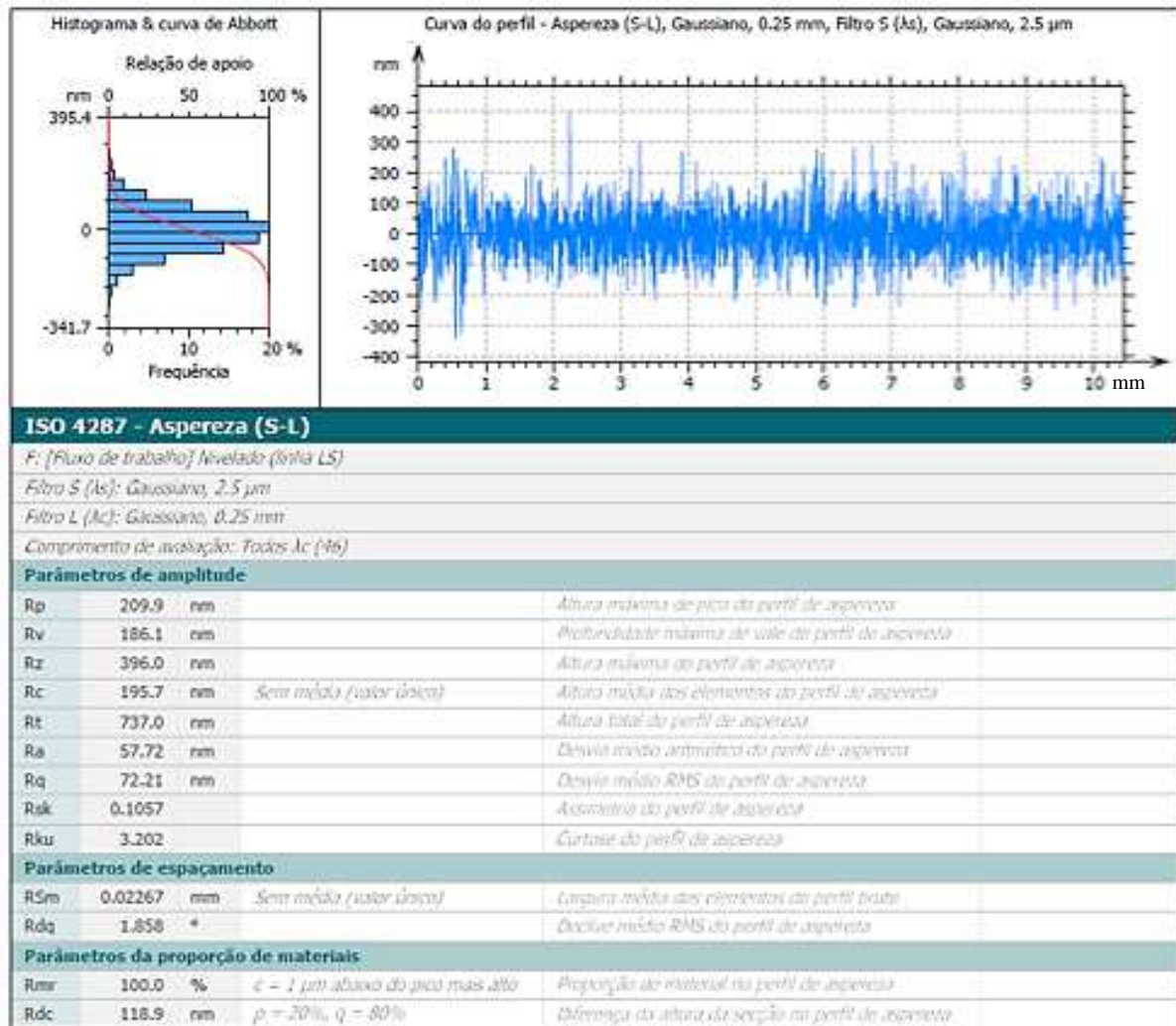


Figura 7.9 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software *MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 10 s.

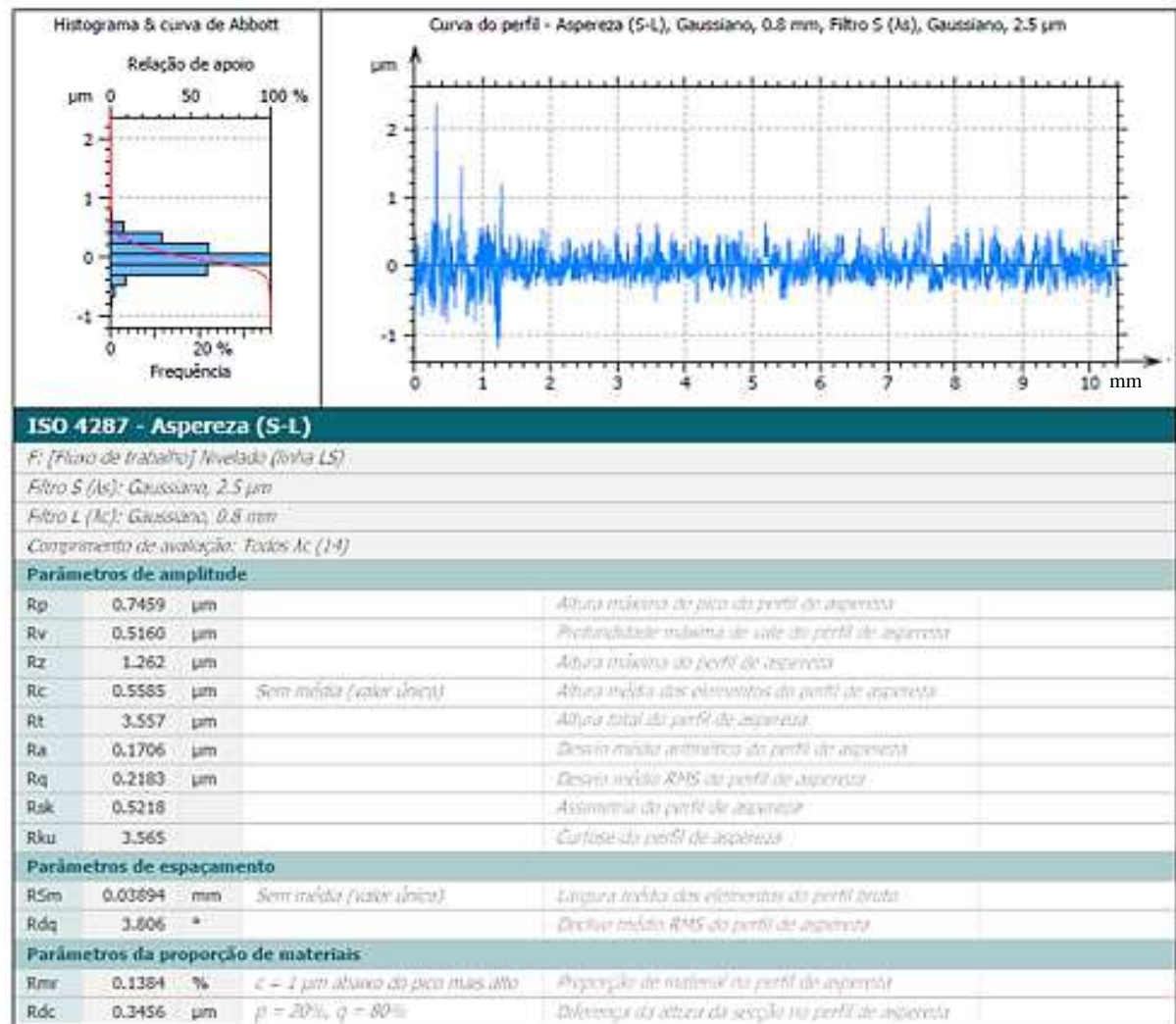


Figura 7.10 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.

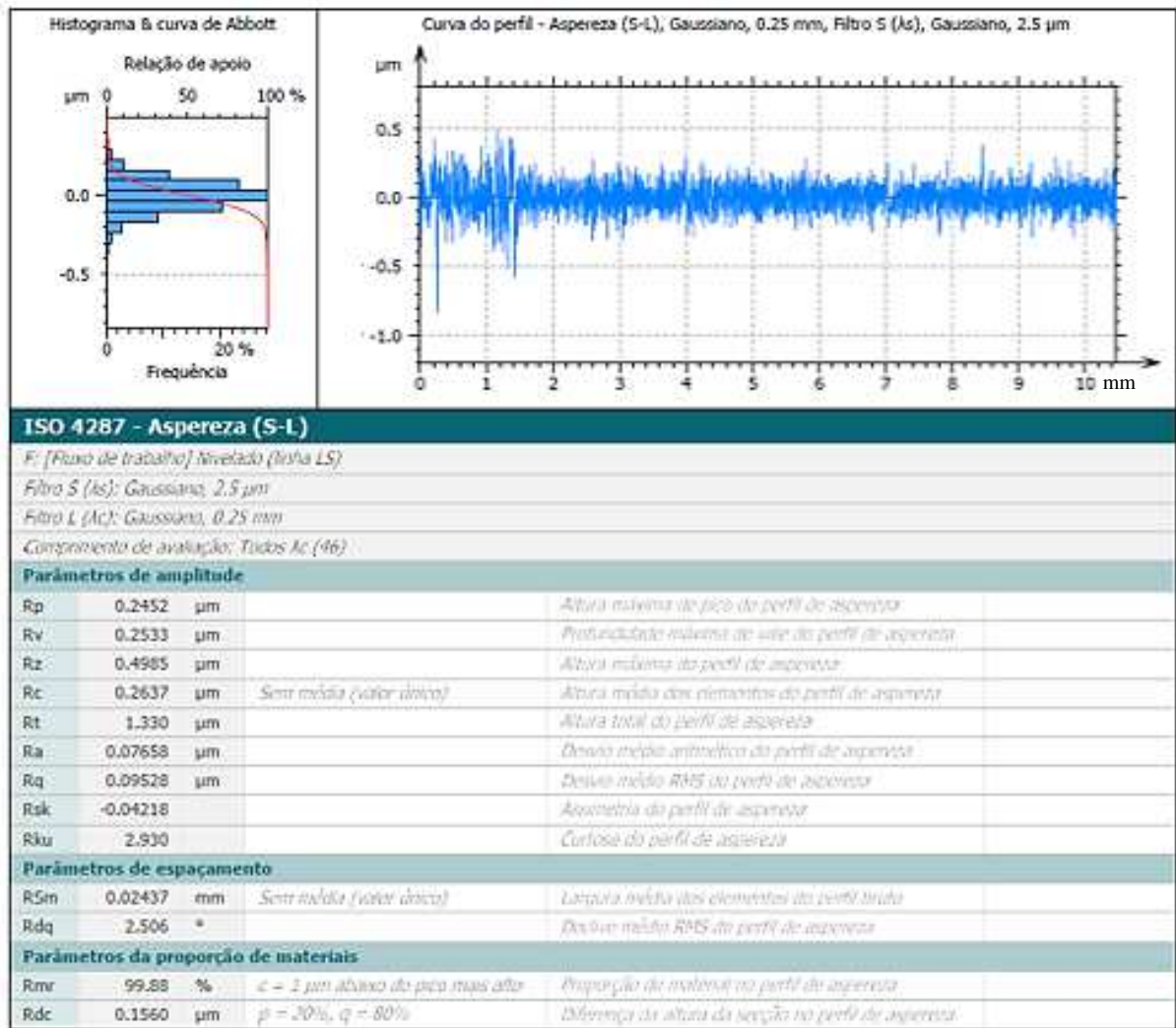


Figura 7.11 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software MountainsLab Premium9 no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.

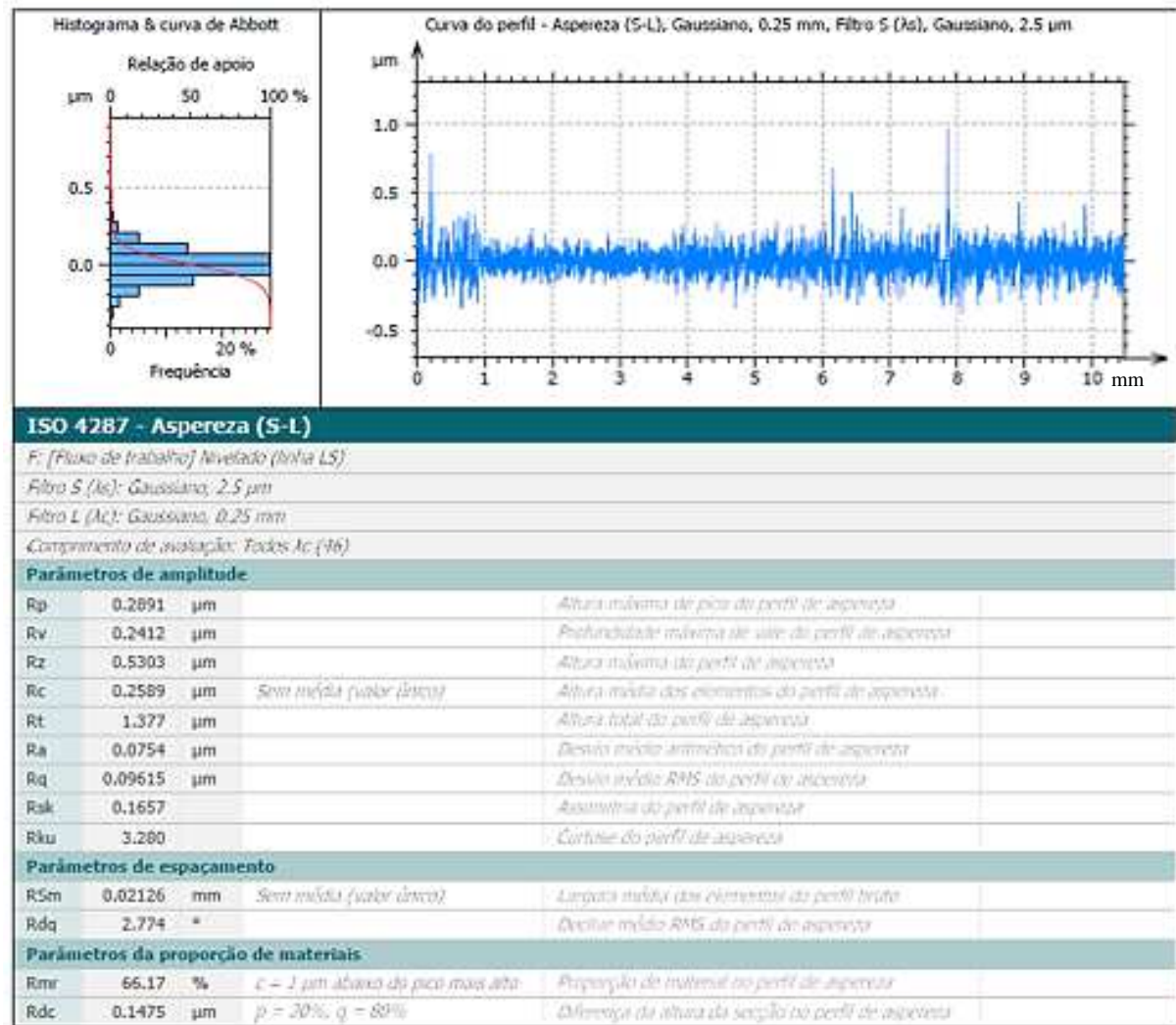


Figura 7.12 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software MountainsLab Premium9 no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 2 V e tempo de passivação de 20 s.

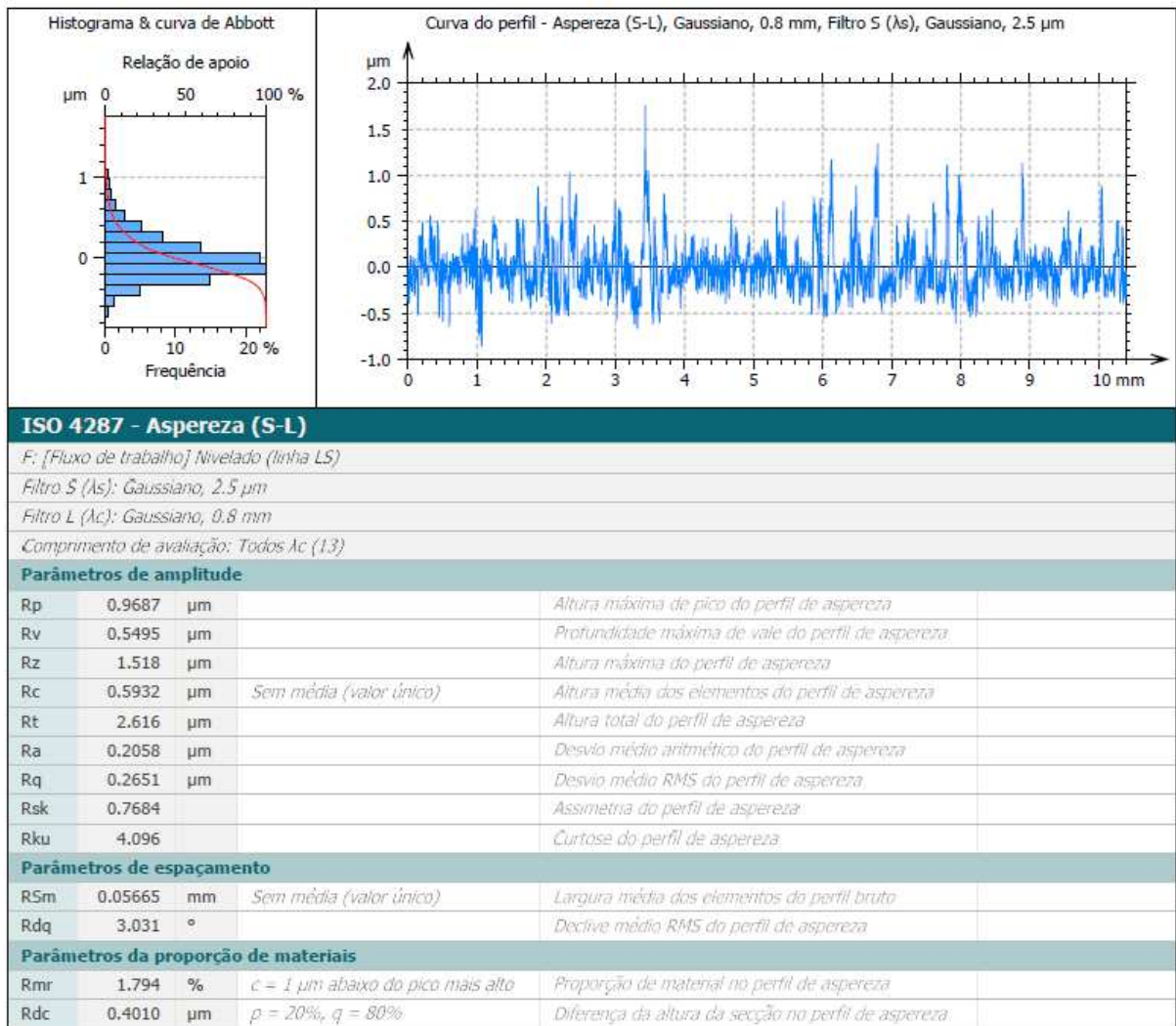


Figura 7.13 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.

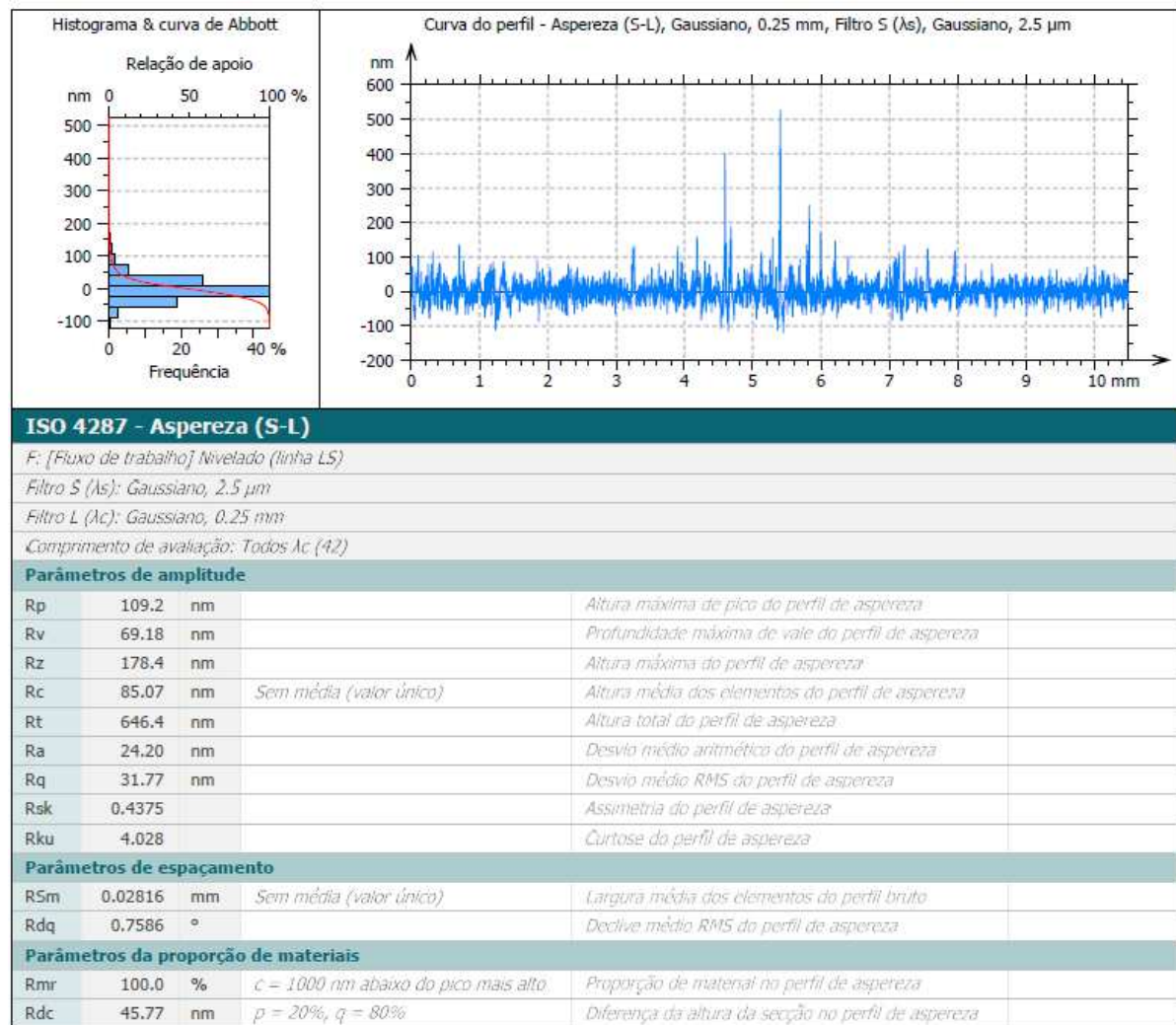


Figura 7.14 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software *MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.

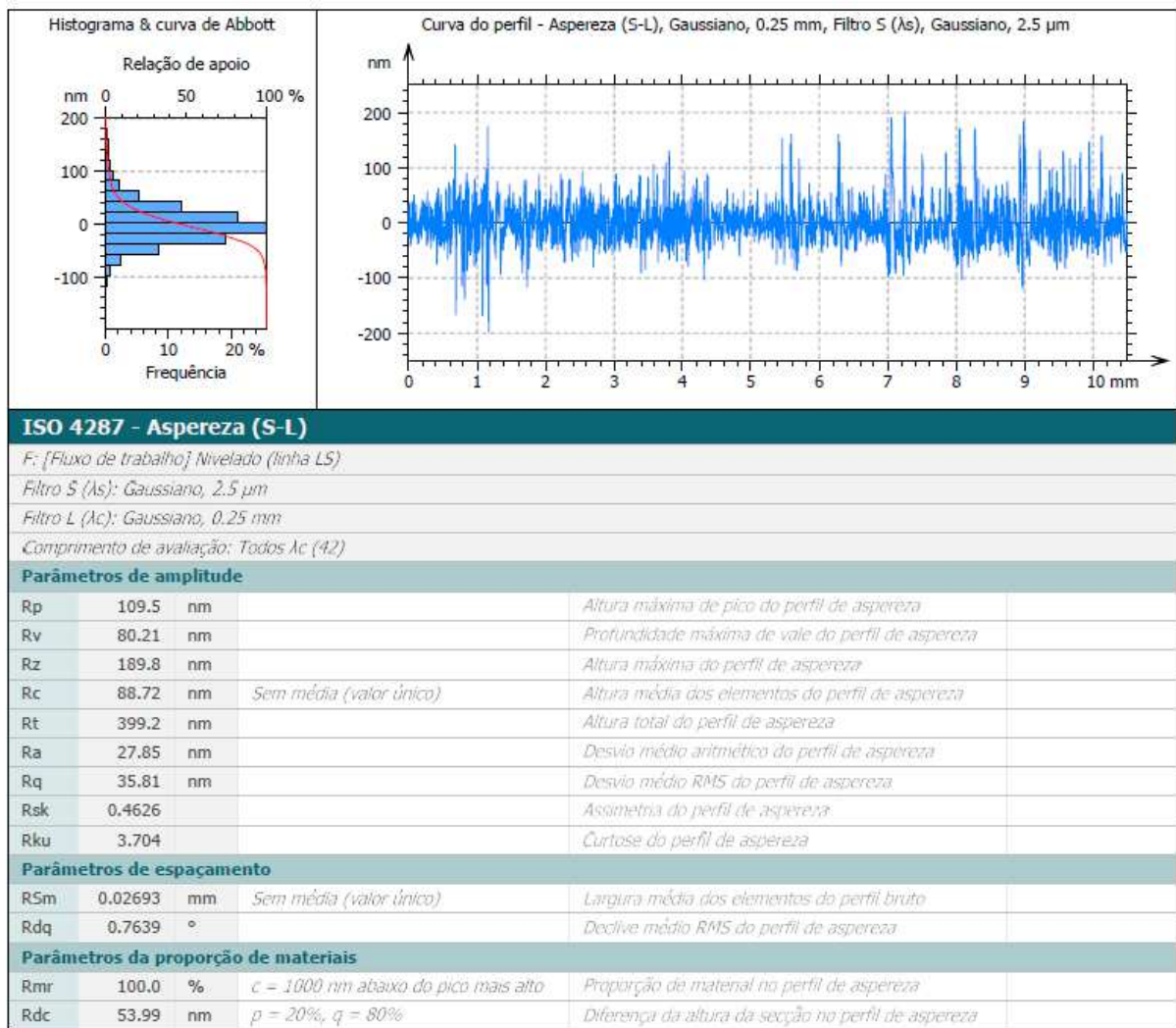


Figura 7.15 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 1 s.

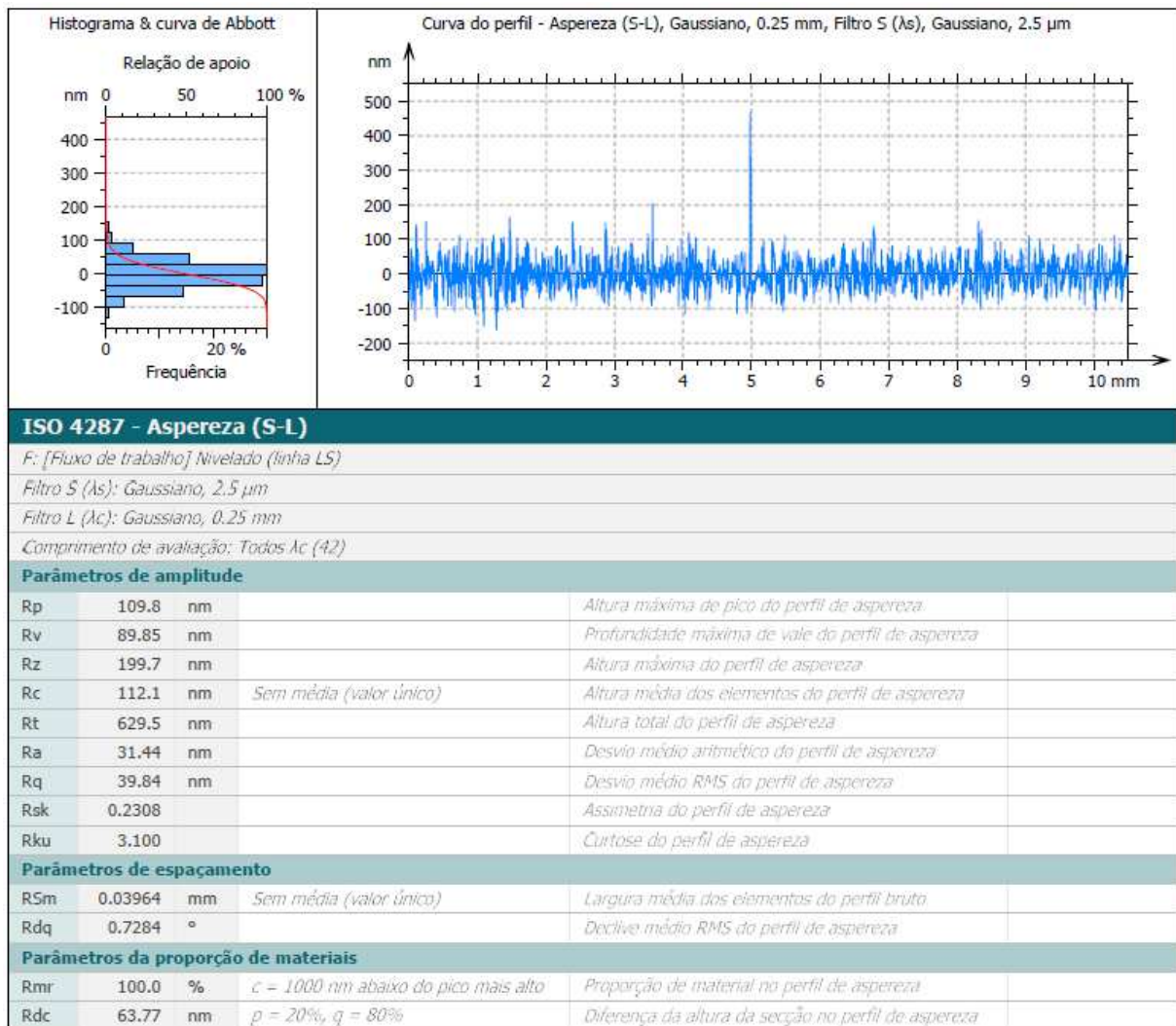


Figura 7.16 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software *MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.

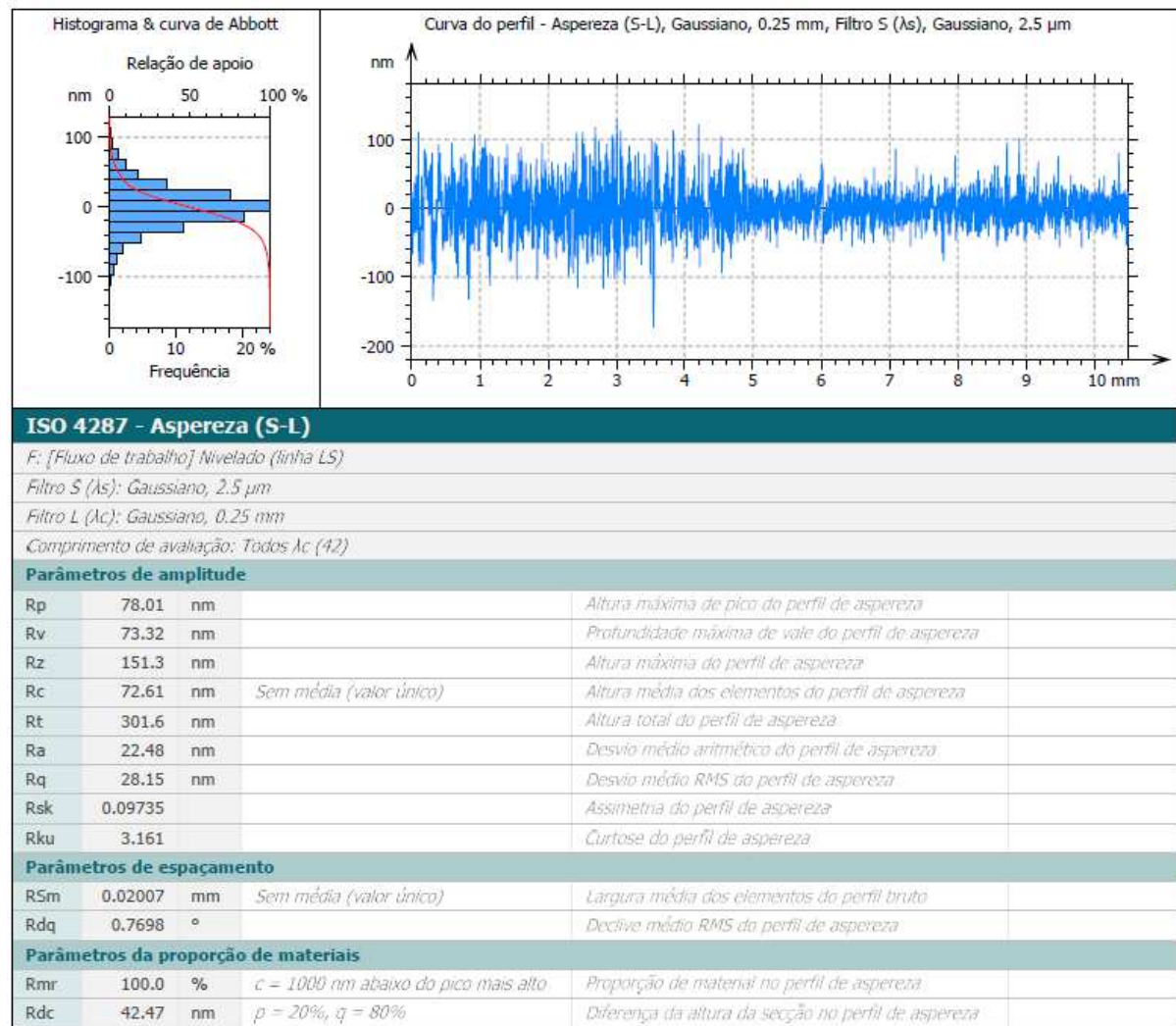


Figura 7.17 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software *MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.

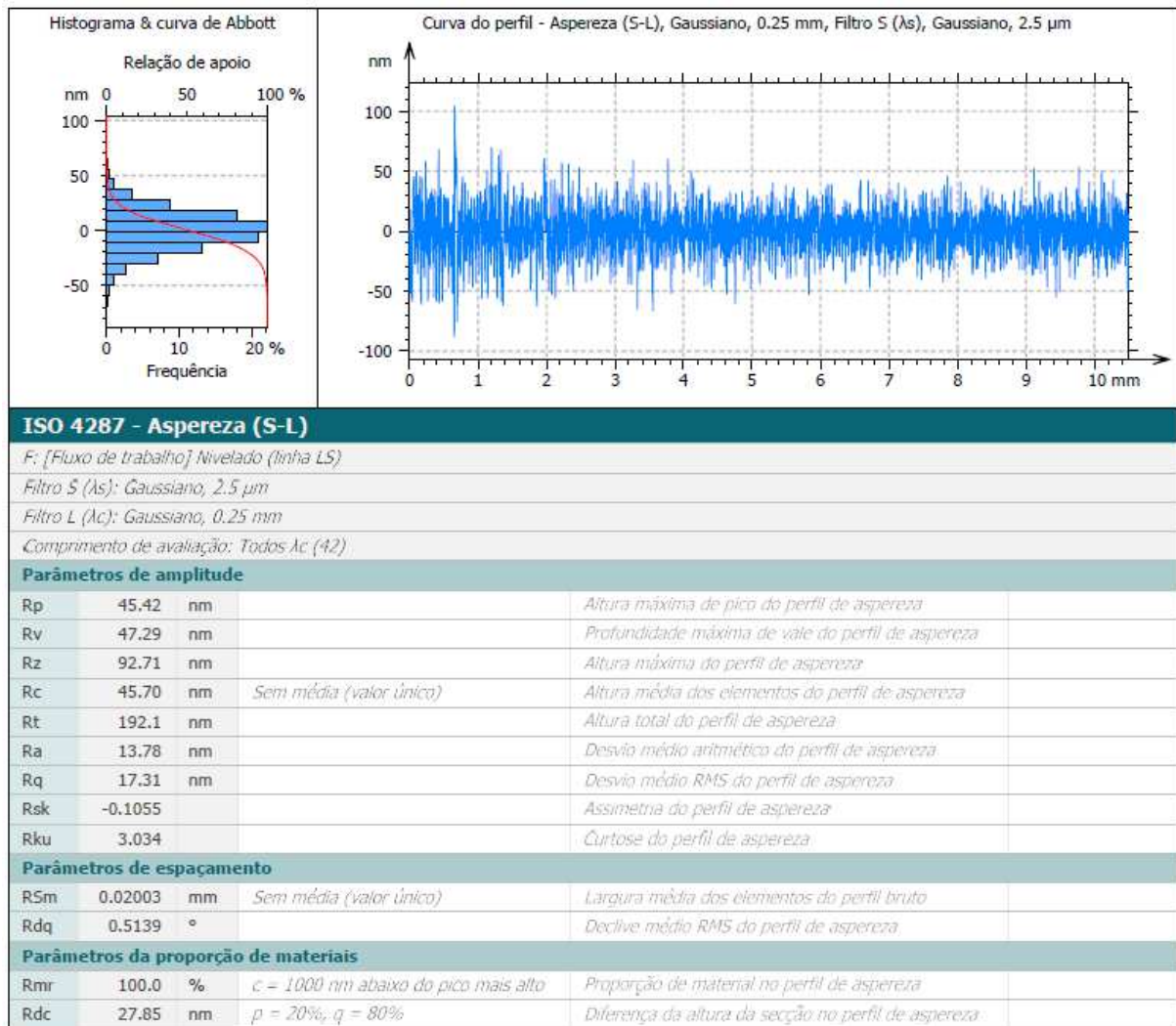


Figura 7.18 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software MountainsLab Premium9 no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 10 s.

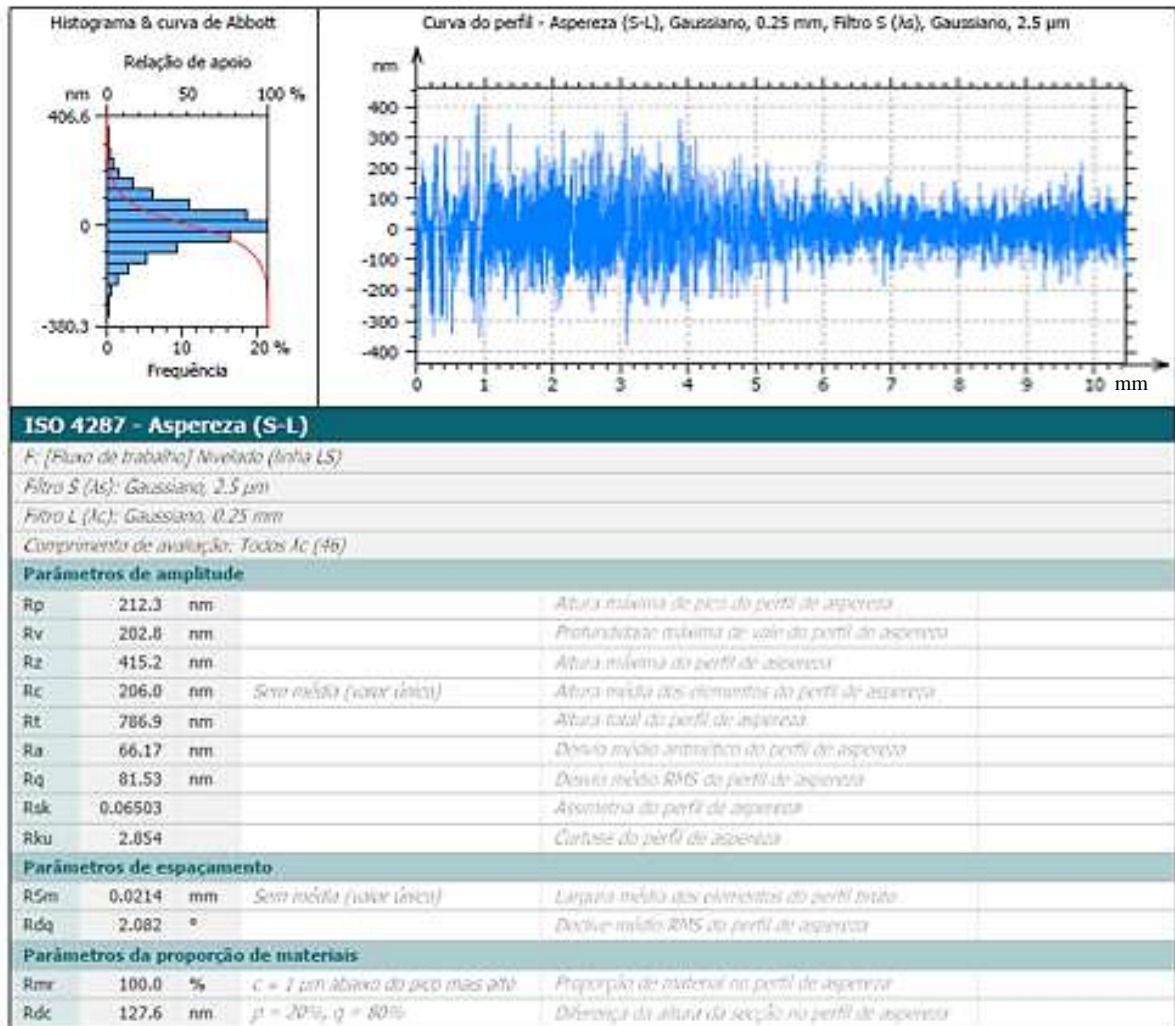


Figura 7.19 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software *MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.

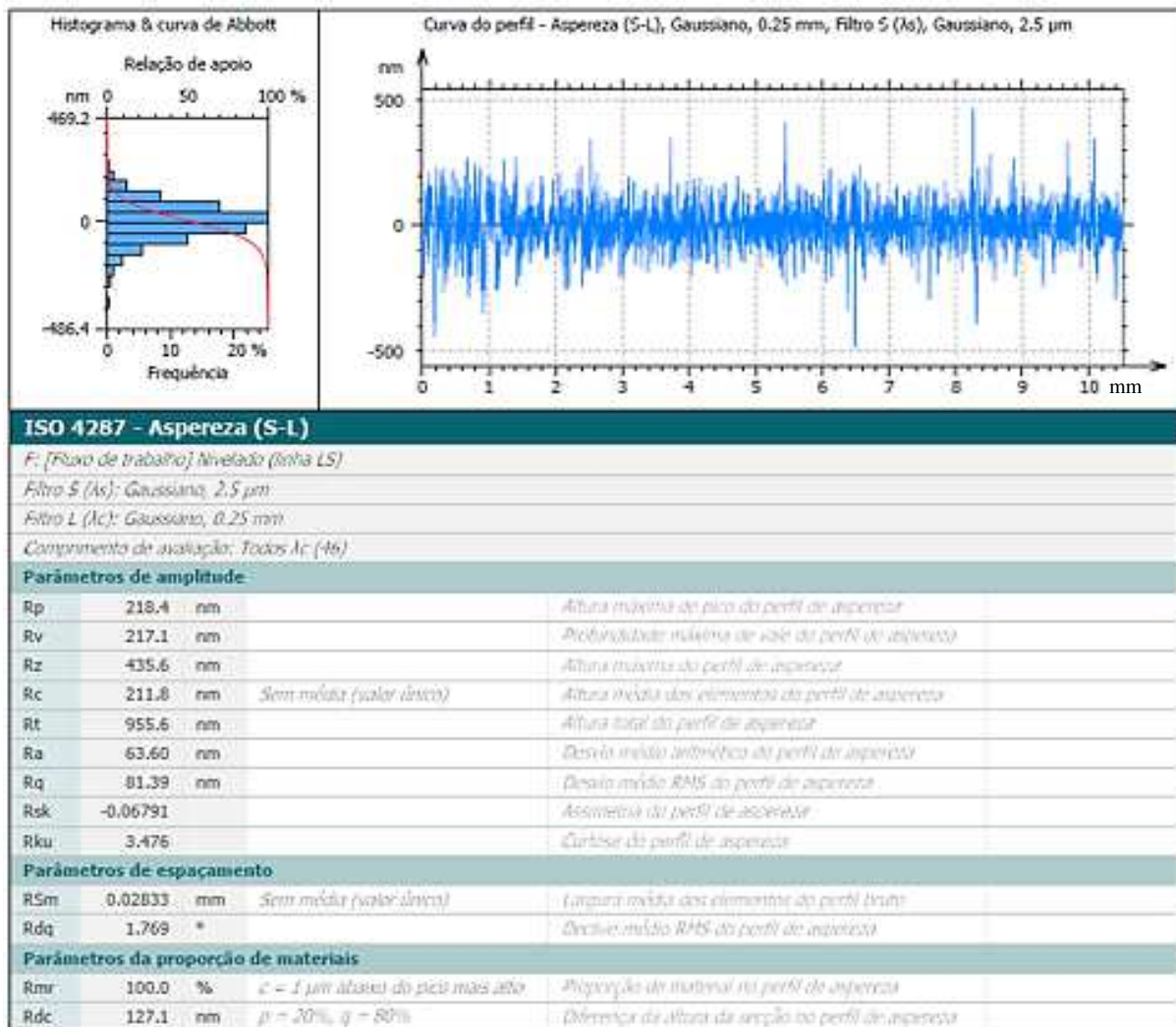


Figura 7.20 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software MountainsLab Premium9 no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.

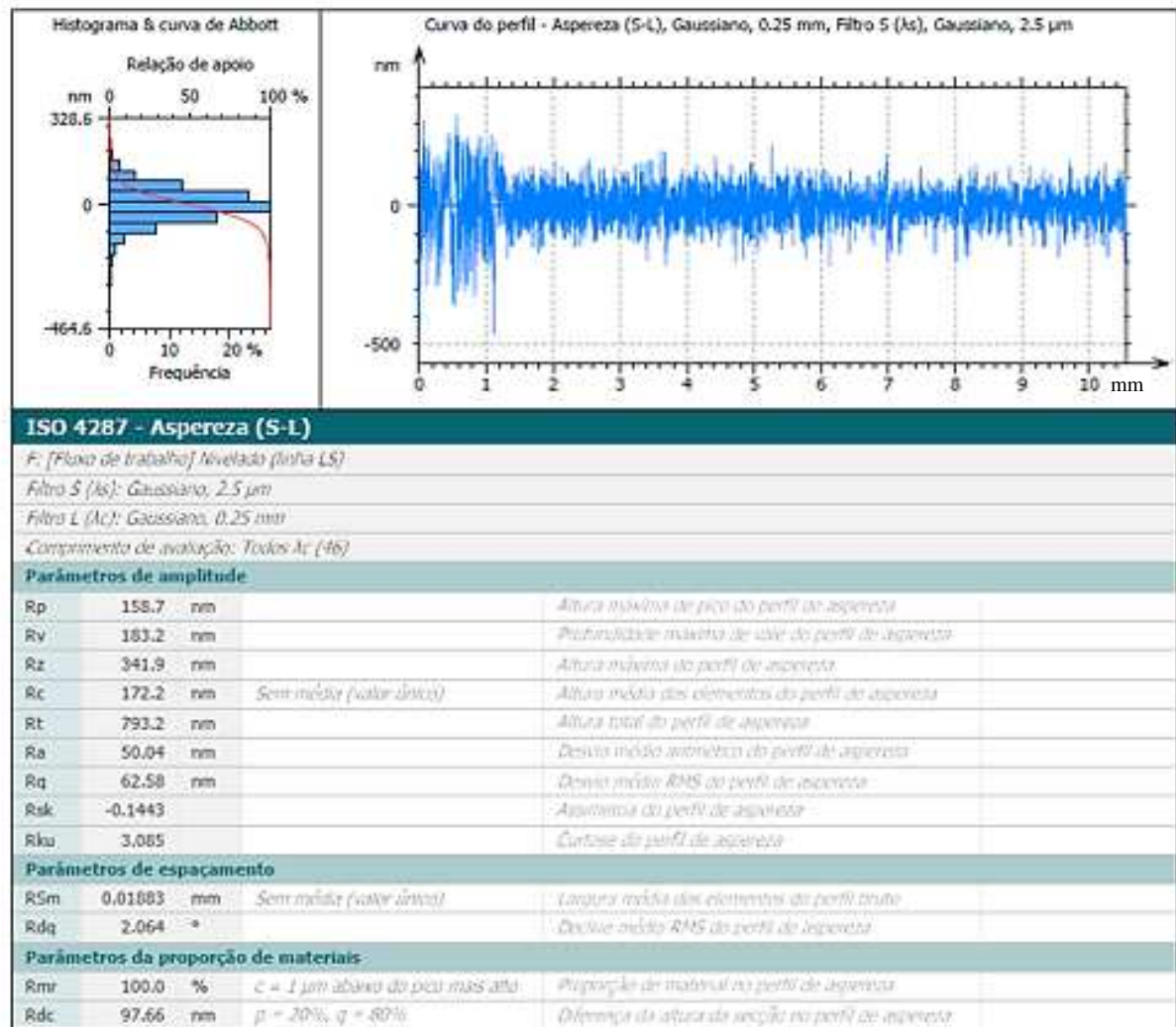


Figura 7.21 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software MountainsLab Premium9 no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 4 V e tempo de passivação de 20 s.

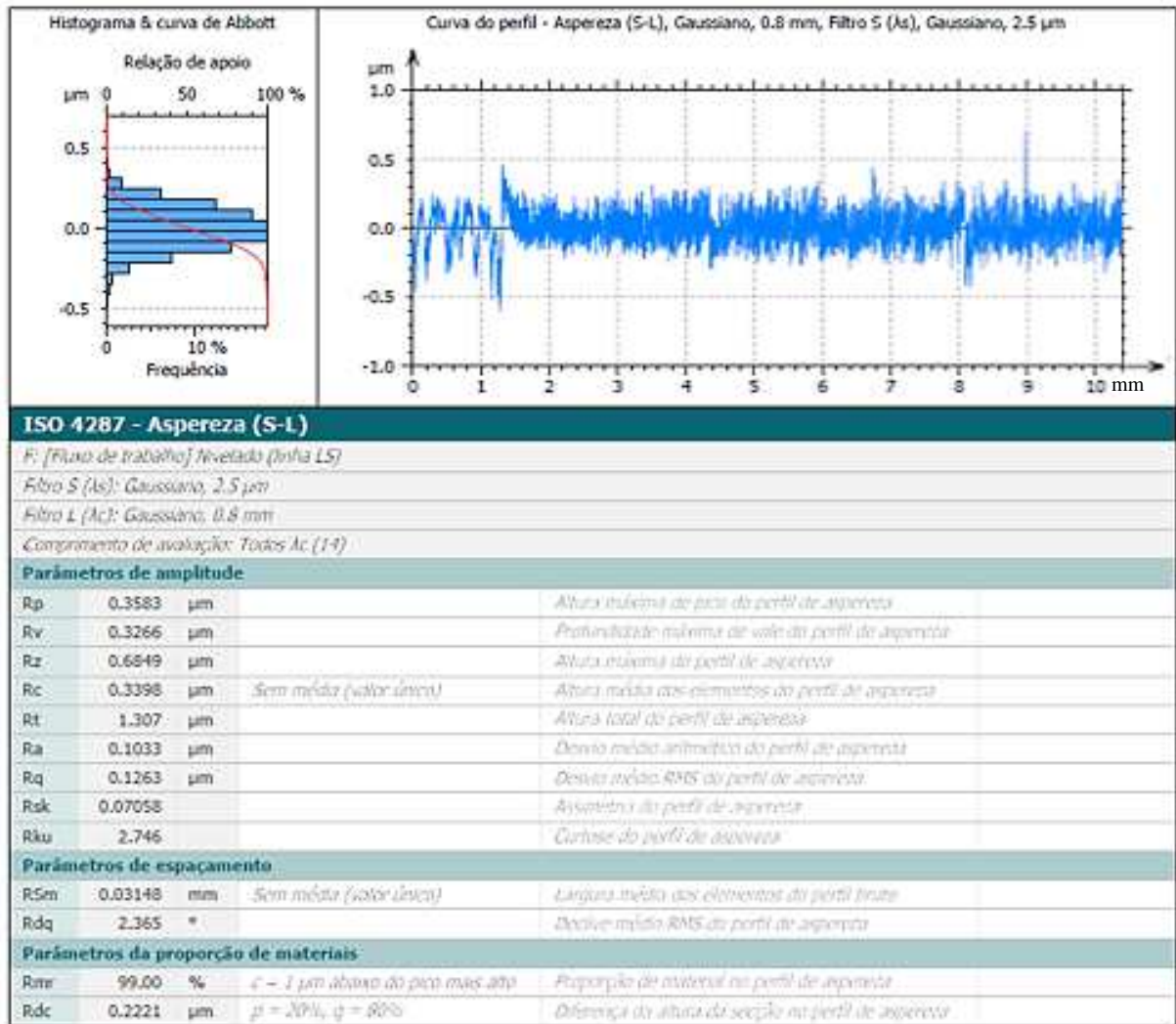


Figura 7.22 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software MountainsLab Premium9 no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.

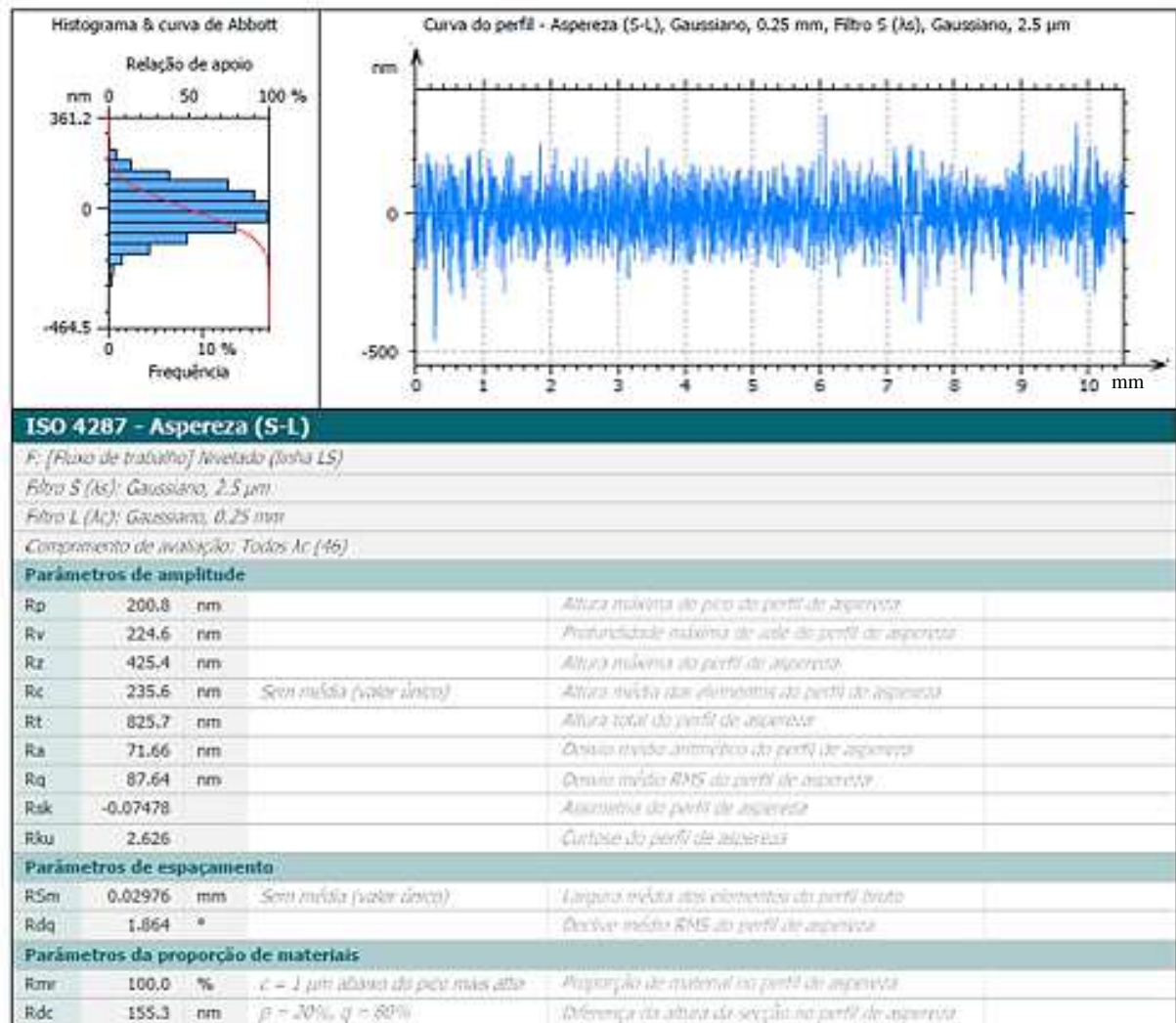


Figura 7.23 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.

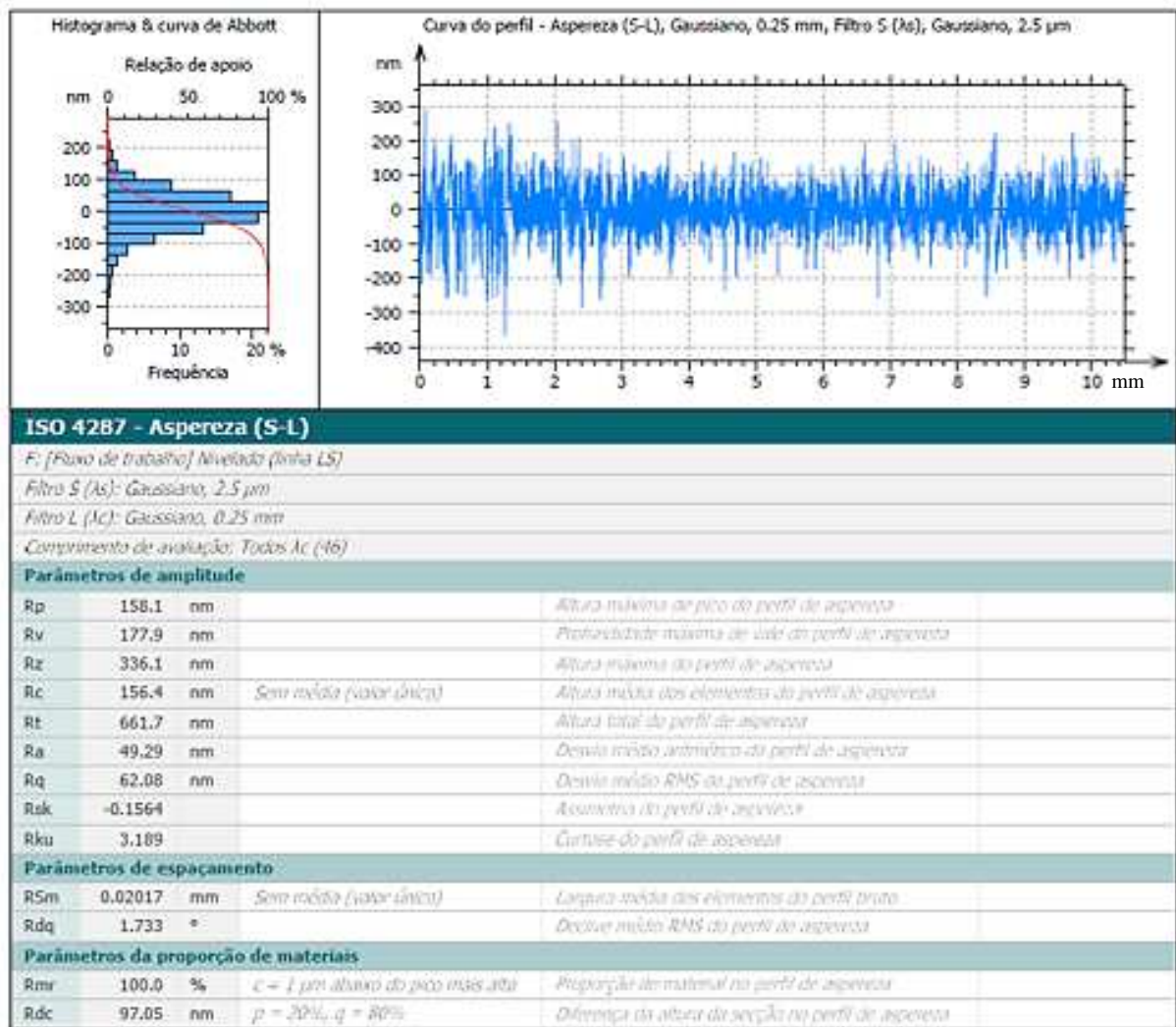


Figura 7.24 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software MountainsLab Premium9 no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 1 s.

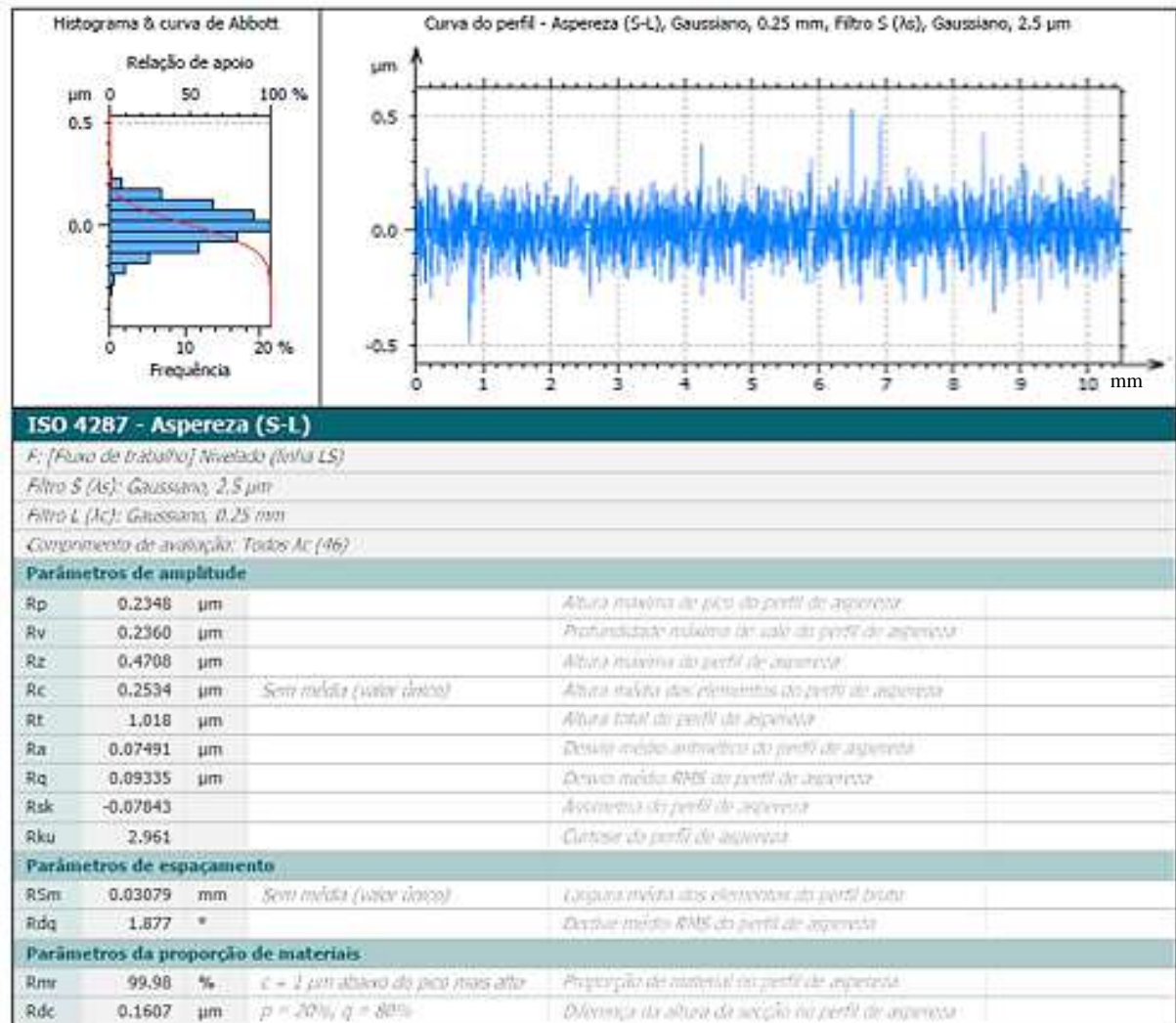


Figura 7.25 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo software *MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 1,35 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.

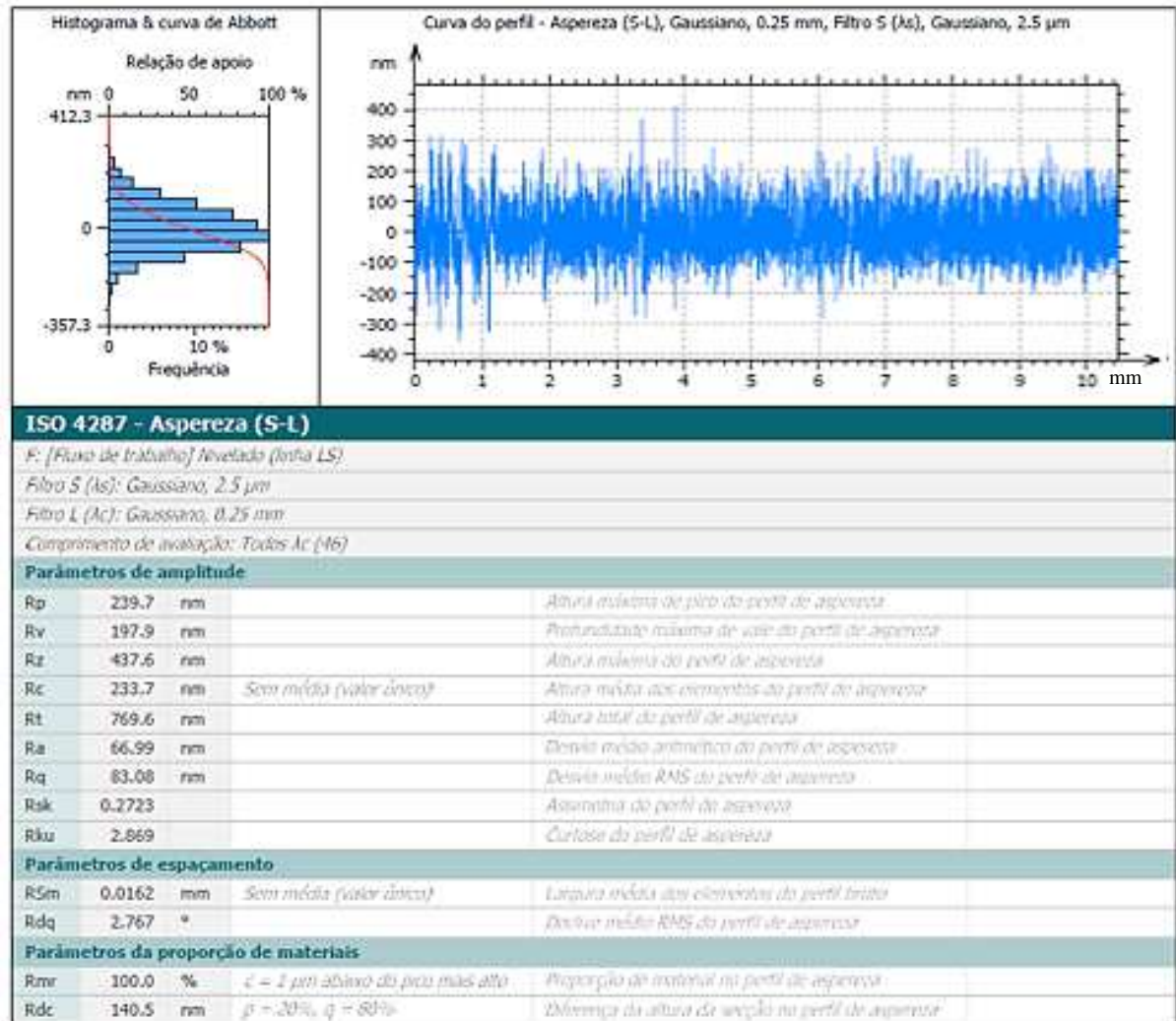


Figura 7.26 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,00 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.

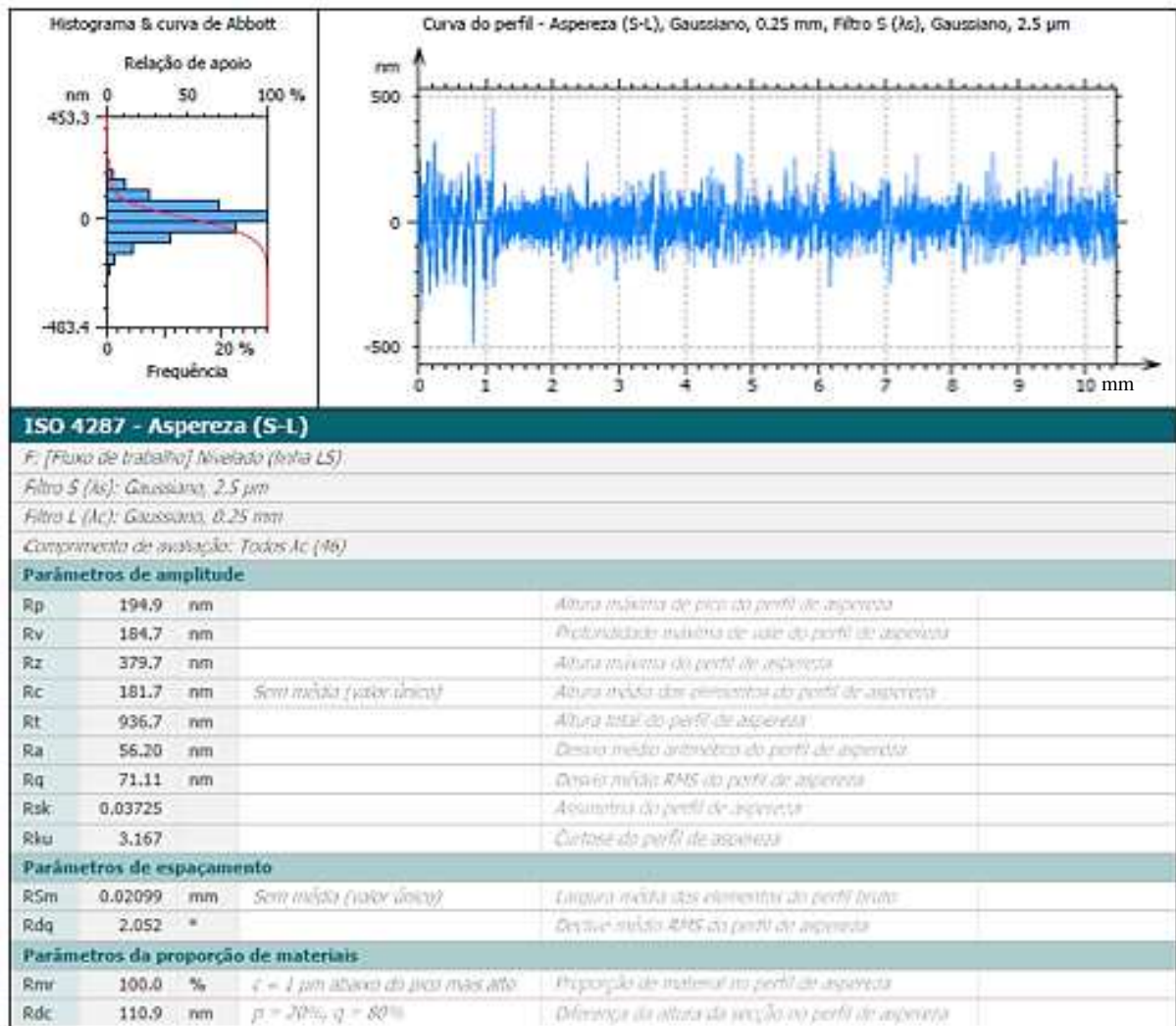



Figura 7.27 - Análise superficial de rugosidade realizada pelo *software MountainsLab Premium9* no comprimento total do microcanal usinado a um V_s 2,65 m/s, V_w 30 mm/min e a_p variável, em superfície de Ti-6Al-4V passivada a uma tensão de 6 V e tempo de passivação de 10 s.

CAPÍTULO VIII

ANEXO

I - Certificado de Calibração Perfilômetro *Form Talysurf Intra50*

	Data: 25/10/2018	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 1 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2018		

1. Cliente

Nome ou Razão Social: LEPU
Endereço: Avenida João Naves de Ávila, 2121
Telefone: (34) 3239-4584
E-mail: Não consta

2. Instrumento de medição

Instrumento: perfilômetro
Tipo: portátil
Fabricante: Taylor Hobson
Tipo: Form Talysurf Intra 2
Resolução: 0,016 μm
Serial: 453
Identificação patrimônio: não tem
Última calibração: 16/11/2017

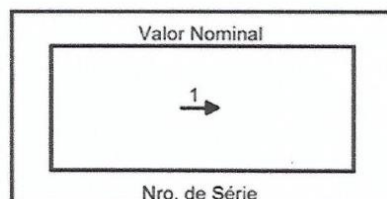
3. Calibração

Ordem do serviço: 01/2018
Data do pedido: 25/10/2018
Data da calibração: 25/10/2018


4. Procedimento

Inicialmente foi realizada a análise visual tanto do instrumento quanto do padrão de rugosidade e não foi notada nenhuma anomalia. O perfilômetro funciona de forma adequada e o padrão se encontra em bom estado de conservação, sem a presença de risco e defeitos aparentes. O padrão de rugosidade possui Ra igual a 0,38 μm e foi adotada uma posição central para a realização das medições. Foram efetuadas dez medições.

A posição de medição pode ser observada na figura abaixo.



Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração. Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG, CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

	Data: 25/10/2018	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 2 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2018		

Condições de Medição: Ra (0,38 μm)
 Cut-off (lr) = 0,8 mm
 Comprimento de avaliação (ln) = 5,6 mm

5. Condições ambientais

Temperatura: (20 \pm 1) °C

6. Padrões e equipamentos

Tipo: Padrão de Rugosidade
 Fabricante: Mitutoyo
 Código: 178-604
 Número de série: 001031008
 Valor nominal: Ra (0,38 μm)
 Número do Certificado de Calibração: 15218/11
 Incerteza expandida: 6 % para $k = 2,65$ e 95 % de abrangência

Tipo: Termo-higrômetro Digital
 Fabricante: Instrutherm
 Modelo: HT-260
 Número de série: 06120362
 Número do Certificado de Calibração: R4996/13
 Incerteza expandida: 0,3 °C para $k = 2,00$ e 95 % de abrangência.

7. Resultados da calibração


Ra (0,38 μm)										
Posição	Leituras (μm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,3881	0,3848	0,3866	0,3915	0,3946	0,3886	0,3900	0,4009	0,3903	0,3965

Nota: Foi apresentado dois algarismos adicionais nos valores de Ra .

Média (μm)	Desvio Padrão (μm)
0,39	0,005

Nota: Foi apresentado um algarismo adicional no valor do desvio padrão.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração. Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco IO Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

	Data: 25/10/2018	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 3 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2018		

8. Incerteza da calibração

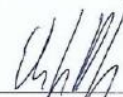
Posição 1	Ra (0,38 μm)	
	U (μm)	k
	0,02	2,39

A incerteza expandida (U) relatada é declarada como a incerteza padrão combinada de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t corresponde a um nível de abrangência de aproximadamente 95 %. A incerteza da calibração foi determinada de acordo com a terceira edição do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (BIPM et al., 2008). Esta incerteza representa 6 % do valor médio de Ra considerado.

Data da Emissão: Uberlândia, (25) de (outubro) de (2018).



Rosenda Valdés Arencibia
Coordenadora do Laboratório
de Metrologia – LEMETRO



Elsio Junior Bonati Borges
Operador

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração. Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584