LUCAS DE PAIVA VIEIRA

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E TEXTURA DA FERRAMENTA DE AÇO RÁPIDO NO MICROTORNEAMENTO DO ALUMÍNIO AA1100



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

LUCAS DE PAIVA VIEIRA

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E TEXTURA DA FERRAMENTA DE AÇO RÁPIDO NO MICROTORNEAMENTO DO ALUMÍNIO AA1100

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação – Microtorneamento.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

UBELÂNDIA – MG

2018

LUCAS DE PAIVA VIEIRA

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E TEXTURA DA FERRAMENTA DE AÇO RÁPIDO NO MICROTORNEAMENTO DO ALUMÍNIO AA1100

Trabalho de conclusão de curso, **APROVADO** pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Banca Examinadora

_____

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi - FEMEC - UFU - Orientador

_____

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva - FEMEC – UFU

Uberlândia

2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que até aqui tem me sustentado e nada tem me faltado.

Agradeço aos meus pais Justino de Sousa Vieira e Nadice Maria Pereira Sousa, os quais sempre foram incentivadores de buscar o melhor. Com eles, descobri que todos os desafios da vida são possíveis com Deus. Obrigado por tudo.

Agradeço também aos meus irmãos Gustavo Pereira Rodrigues, Nathália Pereira Sousa Ribeiro e Miguel Alves Nogueira por não medirem esforços em me ajudar.

À minha melhor amiga Michele Versiani e Silva obrigado pelo incentivo e apoio. Parte do meu crescimento devo aos seus conselhos.

Ao meu orientador Arthur Alves Fiocchi, obrigado por sua contribuição ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho. Agradeço pelo seu exemplo de dedicação, esforço e eficiência.

Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva agradeço pela complementação na orientação, experiência, esmero e constante ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, em especial ao Nícolas Sousa, à doutoranda Déborah de Oliveira, Dr. Maksym Ziberov, Aline Santos, Ivanilson, Guilherme, Leonardo, Andrei Mishchenko, Antonio Vitor de Mello, obrigado por me auxiliarem em todos os desafios apresentados durante a execução deste trabalho.

À equipe de limpeza do LEPU (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem) em especial à Valdirene, obrigado por deixar o ambiente de trabalho limpo e agradável.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica, agradeço pela oportunidade em adquirir conhecimento técnico e científico, e também por permitir o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC), Alcione dos Reis, Thiago Pereira e Thiago Menezes, obrigado pelo conhecimento técnico agregado e auxílio na preparação das máquinas.

À todos os membros do LEPU, o meu obrigado.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) obrigado pelo amplo conhecimento adquirido nos trabalhos disponíveis em sua biblioteca.

VIEIRA, L. P. **Influência da geometria e textura da ferramenta de aço rápido no microtorneamento do alumínio AA1100**. 2018. 136f. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

RESUMO

Devido às demandas por componentes miniaturizados, o microtorneamento é de grande valia para a fabricação de peças e o estudo em qualquer ramo dessa área sempre é muito bem-vindo. O presente estudo aborda o microtorneamento de alumínio comercialmente puro com ferramentas de aço rápido. Esse trabalho visa uma melhor preparação da aresta de corte da ferramenta de aço rápido, aplicando a usinagem eletroquímica após a retificação. As vantagens residem na remoção das rebarbas, texturização das ferramentas e mudança da topografia das superfícies das ferramentas. Os parâmetros de corte escolhidos para o microtorneamento foram a velocidade de corte de 270 m/min, profundidade de corte de 0,2 mm e avanço de 0,05 mm/rev. Para a usinagem eletroquímica, os parâmetros de entrada são: uma corrente de 2 A, uma tensão contínua de 20 V e tempo de ataque de 15 s para concentração de 40 g/l de NaCl aquoso e tempo de 25 s para concentração de 20 g/l de NaCl aquoso no eletrólito. Os parâmetros de saída analisados foram: rugosidade da ferramenta e do corpo de prova, MEV da superfície das ferramentas, caracterização de elementos químicos via MEV-EDS, desgaste da ferramenta e grau de recalque do cavaco. Como resultado observou-se que as ferramentas que passaram por usinagem eletroquímica obtiveram piores resultados de acabamento superficial nos corpos de prova comparado às ferramentas que foram somente afiadas por retificação. O eletrólito de 40 g/l de NaCl aquoso com tempo de ataque de 15 s produziu textura superficial menos rugosa do que as ferramentas processadas com a concentração de 20 g/l de NaCl e tempo de ataque de 25 s. Entre as ferramentas retificadas, a ferramenta com menor γ_o (10°) gerou os melhores valores de rugosidade no corpo de prova. Em todos os ensaios avaliados o cavaco contínuo em forma de fita emaranhou-se na peça, na ferramenta e no minitorno, comprometendo a rugosidade dos corpos de prova. As ferramentas apresentaram adesão de alumínio nas superfícies de saída e de flanco em todos os passes.

Palavras-chave: microtorneamento, alumínio, aço rápido, usinagem eletroquímica, rugosidade, retificação.

VIEIRA, L. P. ***Influence of the geometry and texture of the High Speed Steel tool on micro-turning of aluminum AA1100.*** *2018. 136f. Monograph – Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, 2018.*

ABSTRACT

Due to demands by miniaturized products, the micro-turning is of great value to the manufacture of parts and the study in any branch of this area is always very welcome. The present study approaches the micro-turning of commercially pure aluminum with high speed steel tools. This work aims at a better preparation of the cutting edge of high-speed steel tool applying electrochemical machining after grinding. The advantages lie in the removal of burrs, texturing of the tools and the rounding of the cutting edges of the tools. The cutting parameters chosen for the micro-turning were the cutting speed of 270 m/min, 0.2 mm depth of cut, and feed of 0.05 mm/rev. For the electrochemical machining, the input parameters are: a current of 2 A, a direct continuous voltage of 20 V and attack time of 15 s for 40 g/l concentration of aqueous NaCl and attack time 25 s for 20 g/l concentration of NaCl in aqueous electrolyte. The output parameters analyzed were: roughness of the tool and the specimen, MEV of the surface of the tools, characterization of chemical elements by means of MEV-EDS, tool wear and chip thickness ratio. As a result it was observed that the tools that were submitted to electrochemical machining obtained worse results of surface finish on the specimen compared to the tools that were only sharpened by grinding. The electrolyte of 40 g/l aqueous NaCl with attack time of 15 s produced lower values of surface roughness that the tools processed with concentration of 20 g/l NaCl and attack time of 25 s. Among the ground tools, the tool with minor γ_o (10°) generated the best values of roughness on the specimen. In all the tested conditions, the wandering of continuous ribbon chips around the specimen, cutting tool, and mini-machine tool disturbed the roughness of the specimens. The tools presented adhesion of aluminum on the flank surfaces and rake surfaces in all passes.

Keywords: micro-turning, aluminum, High Speed Steel, electrochemical machining, roughness, grinding.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Δt	Intervalo de tempo [s]
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
a_e	Penetração de trabalho [mm]
a_p	Profundidade de corte [mm]
APC	Aresta postiça de corte
BEDG	Retificação de Descarga dos Eletrodos em Bloco
BNAF	Escovação com Filamentos Abrasivos de Nylon
CAD	*Computer-Aided Design*
CAM	*Computer-Aided Manufacturing*
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CNC	Controle numérico computadorizado
CP	Corpo de Prova
CVD	*Diamond Vapor Deposition*
EBM	Usinagem por feixe de elétrons
ECM	Usinagem eletroquímica
ECMM	*Electro Chemical Micro Machining*
EDG	Retificação por descarga de eletrodo
EDM	Usinagem por descargas elétricas
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
f_C	Avanço de corte [mm/rev]
FM	Ferramenta
H	Espessura de corte [mm]
h’	Espessura do cavaco mm
HR	*Hardness Rockwell*
I	Corrente elétrica [A]
LBM	Usinagem por feixe de *laser*
MBEDG	Movimento de retificação de descargas de eletrodos em blocos
MEMS	Sistema mecânico de micro eletrodos
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
MQF	Mínima quantidade de fluído
mS	MiliSiemens

NaCl	Cloreto de sódio
$NaNO_3$	Nitrato de sódio
NC	*Numeric Command*
SiC	Carboneto de silício
PCBN	Nitreto de boro cúbico policristalino
PCD	Diamante policristalino
PECM	Pulso da Usinagem Eletroquímica
R_a	Desvio aritmético médio de rugosidade [µm]
R_C	Grau de Recalque
Rku	Fator de achatamento do perfil de rugosidade (*Kurtosis*)
R_q	Desvio médio quadrático de rugosidade [µm]
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil de rugosidade (*Skewness*)
R_{Sm}	Média dos espaçamentos entre picos
R_t	Altura total do perfil de rugosidade [µm]
R_z	Altura máxima do perfil de rugosidade [µm]
R_y	Rugosidade máxima [µm]
Rpm	Rotação por minuto
s	Segundo
V_C	Velocidade de Corte [m/min]
V_{cav}	Velocidade de saída do cavaco [m/min]
V	Tensão elétrica [V]
VDC	Tensão elétrica contínua [V]
WC	Carboneto de tungstênio
WEDG	Retificação de descarga de eletrodos em fio
WEDM	Máquina de descarga de eletrodo em fio
γ_o	Ângulo de saída [º]
χ_r	Ângulo de posição principal [º]
χ'_r	Ângulo de posição secundário [º]
ε_r	Ângulo de ponta [º]
α_o	Ângulo de folga principal [º]
α'_o	Ângulo de folga secundária [º]
β_o	Ângulo de cunha [º]
λ_s	Ângulo de inclinação [º]

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO 15
1.1 Motivação 16
1.2 Justificativa 16
1.3 Objetivo do trabalho 17
1.4 Estado de hipótese 17
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 Máquinas-ferramentas para microusinagem 21
2.2 Processo de afiação da ferramenta 22
2.3 Condições de corte 24
2.4 Preparação da geometria da ferramenta 28
2.5 Efeito Escala 34
2.6 Acabamento Superficial 36
2.7 Ferramentas de Corte 38
2.8 Desgaste da ferramenta 39
2.9 Analise do Cavaco 43
2.10 Alumínio AA1100 45
CAPÍTULO III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 47
3.1 Materiais e métodos 48
3.1.1 Máquina-ferramenta 48
3.1.2 Ferramenta de corte 49
3.1.3 Usinagem Eletroquímica 51
3.1.4 Corpo de prova 54
3.2 Parâmetros de Entrada e Saída 55
3.2.1 Rugosidade 57
3.2.2 Imagens das ferramentas 58
3.2.3 Grau de Recalque 58
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES 59
4.1 Rugosidade das ferramentas 59
4.2 Desgaste das ferramentas 62
4.2.1 Rugosidade dos corpos de prova em função do desgaste 68
4.3 MEV-EDS da ferramenta 69
4.4 Rugosidade dos corpos de prova 70
4.5 Grau de Recalque 78
CAPÍTULO V - CONCLUSÃO 81

Sugestões para trabalhos futuros 83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 85
Apêndice A: Análises de MEV-EDS das ferramentas de corte 97

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A microusinagem tem se tornado uma tecnologia de fabricação importante devido à crescente demanda para produtos miniaturizados, ocasionando melhor eficiência no consumo de energia e alta portabilidade de aplicações comerciais. Muitos setores industriais requerem microcomponentes, como por exemplo, telecomunicação, automobilístico, tecnologia biomédica e microinteligente.

A microusinagem possibilita usinar microcomponentes com alta complexidade dimensional e geométrica, processando ampla variedade de metais, ligas metálicas, compósitos, polímeros e cerâmicas. Dentre os processos existentes, destacam-se o microtorneamento, microfresamento e microrretificação.

No microtorneamento, a redução do diâmetro da peça requer rotações mais elevadas em relação ao macrotorneamento, com a finalidade de atingir velocidades de corte adequadas. Enquanto os processos de torneamento convencionais alcançam 30 000 rpm, máquinas de microtorneamento podem atingir 1 000 000 rpm.

Por outro lado, os valores de avanço e a profundidade de corte no microtorneamento são menores que no macrotorneamento, e a atenção com a preparação da aresta de corte deve ser maior a fim de torná-la livre de defeitos, trincas e rebarbas. Consequentemente reduzirá o desgaste das ferramentas, a rugosidade das peças usinadas e as forças necessárias para o cisalhamento.

Nessa etapa se faz fundamental a atenção com o raio da aresta de corte, devido a redução da espessura do cavaco a ser formado. Além disso, a relação entre o tamanho de grão e as propriedades mecânicas das fases constituintes do material, geometria e material da ferramenta de corte começam a governar o processo. O Efeito Escala segundo Koç e Özel (2011) rege todos esses aspectos, e é definido como o crescimento não linear da energia específica de corte com a redução da espessura do material a ser cisalhado.

A ferramenta de corte apropriada para o processo de microtorneamento deve levar em consideração os aspectos citados, e a usinagem eletroquímica mostra-se eficaz como um método de preparação da aresta de corte.

A usinagem eletroquímica enquadra-se nos processos não convencionais, tendo por objetivo usinar quimicamente as peças com a finalidade de melhorar a relação resistência/peso, preservando a resistência mecânica de materiais de baixa usinabilidade.

Além de preparar a aresta de corte, a usinagem eletroquímica é responsável pela alteração na textura e na topografia da superfície de saída e de flanco da ferramenta, sendo capaz de melhorar a rugosidade superficial dessas superfícies e alterar as condições tribológicas durante o corte, facilitando o escoamento do cavaco, reduzindo a adesão na ferramenta, a temperatura durante o corte e o desgaste da ferramenta.

Aliado a todos esses processos as máquinas-ferramentas de ultraprecisão ou minimáquinas são importantes para o desenvolvimento da microusinagem, no que tange à complexidade e qualidade superficial das peças usinadas.

Tendo em vista tais fatos, este trabalho teve por objetivo utilizar um minitorno adaptado com controle numérico computadorizado, para avaliar o melhor modo de preparação da ferramenta (usinagem mecânica ou eletroquímica), bem como o seu desgaste em cada condição.

1.1 Motivação

Contribuir com as pesquisas de texturização de ferramentas de corte com a usinagem eletroquímica e avaliar os efeitos no microtorneamento.

1.2 Justificativa

A microusinagem carece de pesquisas e inovações científicas e tecnológicas. A influência dos parâmetros de corte, profundidade de corte, preparação da aresta de corte com usinagem eletroquímica, texturização das superfícies da ferramenta e processos de retificação ainda precisam ser mais avaliados para uma utilização mais adequada no processo de microtorneamento.

1.3 Objetivo do trabalho

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma contribuição ao estudo de microtorneamento de alumínio comercialmente puro com ferramenta de aço rápido com diferentes texturas produzidas por usinagem eletroquímica, analisando a influência da variação dos parâmetros de usinagem na rugosidade do corpo de prova, desgaste da ferramenta, grau de recalque do cavaco, imagens obtidas por microscópia eletrônica de varredura (MEV) e caracterização dos elementos químicos próximos a aresta de corte da ferramenta por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) após usinagem.

1.4 Estado de hipótese

A preparação da geometria da ferramenta de corte de aço rápido empregando a usinagem eletroquímica após a afiação por retificação em uma afiadora universal deve influenciar positivamente o microtorneamento, melhorando o acabamento superficial das peças e aumentando a vida da ferramenta.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas as principais etapas que envolvem o microtorneamento, contendo os possíveis passos para preparação das ferramentas e informações de pesquisas científicas para auxiliar nos experimentos deste trabalho. Uma vez que as pesquisas científicas sobre o microtorneamento não são tão amplas como as pesquisas científicas acerca do torneamento convencional, foi necessário relacionar esses assuntos, pois as experiências aprendidas com os macroprocessos fornecem recursos valiosos para a microusinagem.

Comparando os processos de torneamento em macroescala com a microescala percebe-se diferenças e similaridades, tais como, o efeito escala, a geometria das ferramentas, as propriedades dos materiais envolvidos no processo, os parâmetros de usinagem, características gerais das máquinas-ferramentas, integridade superficial das peças e das ferramentas e os mecanismos de formações dos cavacos (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006; FILIZ *et al*., 2007).

Os processos de microusinagem podem também ser classificados em: processo de remoção por forças mecânicas, de remoção por fusão e vaporização, usinagem por feixe de *laser* (*LBM-Laser Beam Machining*), usinagem por feixe elétrico (*EBM-Electro beam machining*), remoção de material por usinagem eletroquímica (*ECM-Eletronchemical machining*), a remoção de material por dissolução eletroquímica, deformação plástica (perfuração e pressão), solidificação (moldagem e fundição), laminação (estereolitografia), recomposição (eletroformação) e processos tradicionais de usinagem (microtorneamento, microfresamento e microfuração) (MASUZAWA, 2000).

A escolha do material da ferramenta de corte é definida de acordo com o material da peça escolhida para o microtorneamento. As ferramentas mais usadas

para fabricação de microcomponentes são as ferramentas de nitreto de boro cúbico policristalino (*PCBN-Polycrystalline Cubic Boron Nitride*), diamante policristalino (*PCD-Polycrystalline Diamond)*, diamantes monocristais, aços rápidos e metal duro, podendo ser revestidas ou não revestidas (PILJEK; KERAN; MATH, 2014).

Alguns exemplos de peças microusinadas são mostrados na Fig. 1.1.



(a) (b) (c)

Figura 1.1 - (a) Canais microfresados com paredes em degrau, (b) componente neurovascular, e (c) microengrenagem (LIU, DEVOR; KAPOOR, 2004).

Processos eletroquímicos oferecem vantagens distintas dos processos mecânicos na microusinagem, pois o não contato mecânico direto entre a ferramenta e a peça de trabalho evita problemas como deformação plástica, vibração e ruptura drástica na aresta de corte da ferramenta (RAJURKAR *et al.,* 2006).

Na Tabela 2.1 é apresentada uma comparação entre os processos de microusinagem e observa-se que a microusinagem por meio de processos mecânicos se sobressai sobre os outros processos de maneira geral. A possibilidade de combinação dos aspectos positivos de dois ou mais processos é bastante atrativa, buscando significativos aperfeiçoamentos dos resultados de microusinagem (AUTOR).

Tabela 2.1 – Comparação dos processos de microusinagem (adaptado de RAJURKAR *et al.,* 2006).

	Complexidade Geométrica	Variedade de Materiais	Prototipagem	Produção em massa	Qualidade superficial	Preço
Processos aditivos	+	-	+		o	+
Processos eletrolíticos e eletroquímicos	+	o	+	-	o	+
Processos por feixe de energia	o	+	+	-	o	o
Litografia	-	-	-	+	+	-
Processos mecânicos	+	o	+	o	+	+
Processos *Near net shape*	o	o	-	+	o	o

Obs: “+”Bom, “o” Intermediário, “-” Ruim

2.1 Máquinas-ferramentas para microusinagem

As máquinas-ferramenta para microusinagem devem ser capazes de reproduzir, com confiabilidade, peças em dimensões e tolerâncias micrométricas aceitáveis para os padrões desse processo além de possuir elevada precisão de posicionamento e movimentação, repetibilidade, estabilidade térmica, rigidez estrutural, alta resolução linear e rotacional (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006; CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Hoffman, Souza e Santos (2017) apresentaram um estudo sobre a utilização de dois centros de usinagem, uma microfresadora e uma máquina de controle numérico computadorizado (CNC) convencional para comparar os resultados entre elas no microfresamento de formas complexas. Concluíram que a microfresadora foi superior na comparação de análise de forma e na rugosidade média (R_a) das peças, mas que a CNC também não ultrapassou os limites de reprovação desses resultados, sendo viável seu uso para microusinagem.

A operação dessas máquinas deve fornecer condições de controle de movimento e alimentação adequados em paralelo com o monitoramento em tempo real dos parâmetros do processo. As deformações mecânicas e térmicas, vibrações e sistemas de fixação restringem a utilização de máquinas convencionais, esses efeitos são reduzidos com a utilização de máquinas específicas, destinadas à usinagem micrométrica de ultraprecisão, no entanto, essas máquinas são extremamente caras (RAHMAN *et al*., 2010).

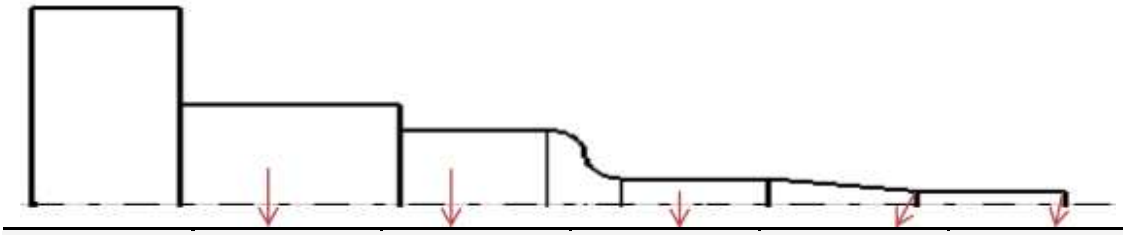
Nas últimas duas décadas, um esforço considerável foi gasto no desenvolvimento de sistemas de controle numérico com códigos abertos para se adaptar a diferentes tipos de equipamentos computadorizados. Os fabricantes de máquina-ferramentas reconheceram esses sistemas como uma solução para o desenvolvimento de programas computacionais, onde cada usuário pode modificar e contribuir para melhorias adaptativas em seus equipamentos (STAROVEŠKI *et al*., 2013).

Uma das dificuldades das máquinas-ferramentas utilizadas para o microtorneamento é o longo tempo necessário para realizar "*set up*" da operação e os fatores contribuintes para isso são: a detecção do contato ferramenta-peça e a capacidade de remoção de material na peça usinada. Outra limitação das máquinas-ferramentas convencionais para aplicações em microusinagem é o limite de rotação do eixo-árvore. Têm sido realizadas tentativas de adicionar ultrassons em vibração à ferramenta com a finalidade de melhorar a capacidade de remoção, porém foram

somente testadas em laboratórios, sob condições muito controladas. (COELHO *et al.,* 2007 *apud* Da Silva, 2010).

Da Silva (2010) fez uma comparação dos resultados da microusinagem da liga de alumínio BS EN AW-2011 usando um torno CNC apresentado na Tabela 2.2 e concluiu que a precisão e a repetibilidade não é tão boa quanto o desejável para operações de microtorneamento, pois houve variações significativas dos diâmetros da peça.

Tabela 2.2 – Comparação dos resultados para testes de repetibilidade e precisão do torno CNC.



MEDIDA TEÓRICA (DIÂMETRO)	4 ,000 (mm)	3,000 (mm)	1,000 (mm)	0,500 (mm)	0,500 (mm)
CORPO DE PROVA 1	3,998	3,005	0,997	0,593	0,650
CORPO DE PROVA 2	4,006	3,002	0,930	0,535	0,614

2.2 Processo de afiação da ferramenta

Processos mecânicos de afiação ocorrem por meio da remoção de material da ferramenta de corte usada, desgastada ou avariada ou em blanques que serão transformados em ferramentas novas. Segundo Mello *et al*. (2015), se uma ferramenta não se encontra em condições de corte apropriadas, com a geometria comprometida por apresentar desgastes acima dos valores determinados pela norma ISO 3685 (ISO, 1993), desenvolvem-se elevados esforços de usinagem e vibrações no sistema. Uma das vantagens de aproveitar a ferramenta por meio da reafiação é a redução de custos de aquisição de novas ferramentas.

A afiação da ferramenta objetiva conseguir melhores resultados no corte, deixando a aresta de corte com dimensões precisas e baixas tolerâncias. Para afiação de aço rápido é comum usar rebolos de óxido de alumínio (Al_2O_3). Neto e Da Silva (2001) compararam a retificação de peças de aço rápido com rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN) e com rebolo de Al_2O_3 e constataram a melhor eficiência

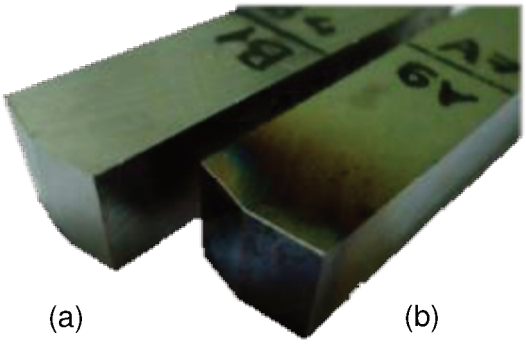
do rebolo de CBN em todos os parâmetros avaliados, a saber: rugosidade (R_a), corrente elétrica medida no motor (I), formação de rebarbas, comprimento de queima, estabilidade da operação, desgaste dos rebolos, ruídos e vibrações.

A dressagem é uma operação característica dos processos de retificação de rebolos abrasivos, uma vez que é usada para reafiar o rebolo quando apresenta condições de corte em baixo desempenho. É ideal para remover a superfície desgastada, arrancando os abrasivos danificados e reestabelecendo as condições de corte do rebolo (FIOCCHI, 2014).

O processo de retificação por rebolo abrasivo geralmente causa um consumo não uniforme na superfície do rebolo. Outro dano que surge no rebolo é o preenchimento dos espaços vazios entre os abrasivos por cavacos do material retificado, resultando em um maior atrito, maior temperatura e, consequentemente, uma perda da eficiência de retificação, comprometendo a rugosidade e as propriedades mecânicas do material usinado (DIAS, 2013).

Vendrame *et al.* (2014) e Dos Anjos (2015) estudaram os danos térmicos no processo de retificação do aço rápido com rebolo de Al_2O_3 e constataram que quando a peça queima (excesso de temperatura) sua dureza diminui, alterando os mecanismos de corte nas peças, tendendo a maior deformação plástica e ao sulcamento, ao invés de cisalhamento (corte).

Mello *et al.* (2015) utilizaram rebolos de Al_2O_3 para afiação de ferramentas de aço rápido. Na Figura 2.1 são apresentadas as ferramentas afiadas. Para a Fig. 2.1 a foi utilizado uma profundidade de corte de 0,06 mm. Na Fig. 2.1 b utilizou-se uma profundidade de corte de 0,12 mm. Percebe-se na comparação entre as figuras, que a Fig. 2.1 b possui a presença de flanges de calor (mudança de coloração da ferramenta).



(a) (b)

Figura 2.1 - Ferramentas de aço rápido retificadas: (a) sem queima e (b) com ocorrência de queima observada pela mudança de coloração (adaptado de MELLO *et al.,* 2015).

Da Silva (2010) concluiu que a reafiação das ferramentas de corte no torneamento é dispensável devido ao enorme acervo de pastilhas existentes, uma vez que as ferramentas reafiadas não apresentam resultados satisfatórios quanto à precisão dimensional, prejudicando o acabamento superficial das peças usinadas quando comparado com a usinagem usando pastilhas novas. A pastilha de corte nova dispensa também o tempo da afiação e apresenta um melhor custo-benefício, sendo a troca da pastilha desgastada ou avariada por uma nova mais conveniente para a produção.

2.3 Condições de corte

As condições de corte diferem significativamente o macrotorneamento do microtorneamento. O avanço de corte do microtorneamento pode ser cerca de 1 000 vezes menor que os avanços de corte comuns em operações de acabamento do torneamento convencional, assim como a profundidade de corte pode reduzir em cerca de 30 vezes com relação à escala macro (ZIBEROV, 2018).

Uma das dificuldades da microusinagem é atingir a velocidade de corte apropriada para o processo, pois com suas ferramentas e diâmetros das peças na escala micrométrica, faz-se necessário um aumento da rotação do eixo árvore da máquina (JUN et al., 2002; FILIZ *et al.,* 2007; KANG *et al.,* 2007; COELHO *et al.,* 2007 *apud* Da SILVA, 2010). As rotações das máquinas para os processos de microusinagem geralmente variam entre 30 000 rpm a 100 000 rpm, podendo chegar a 1 000 000 rpm (ROBINSON e JACKSON, 2005; ZIBEROV, 2018).

A afiação da ferramenta de torneamento depende de 8 ângulos, resultante do encontro de três superfícies da ferramenta de corte. Esses ângulos são: posição principal (χ_r), posição secundário (χ'_r), de ponta (ε_r), de folga principal (α_o), de folga secundária (α'_o), de saída (γ_o), de cunha (β_o) e de inclinação (λ_s). A maioria desses ângulos são apresentados na Fig. 2.2 (MELLO *et al*., 2015; MACHADO *et al*., 2015).

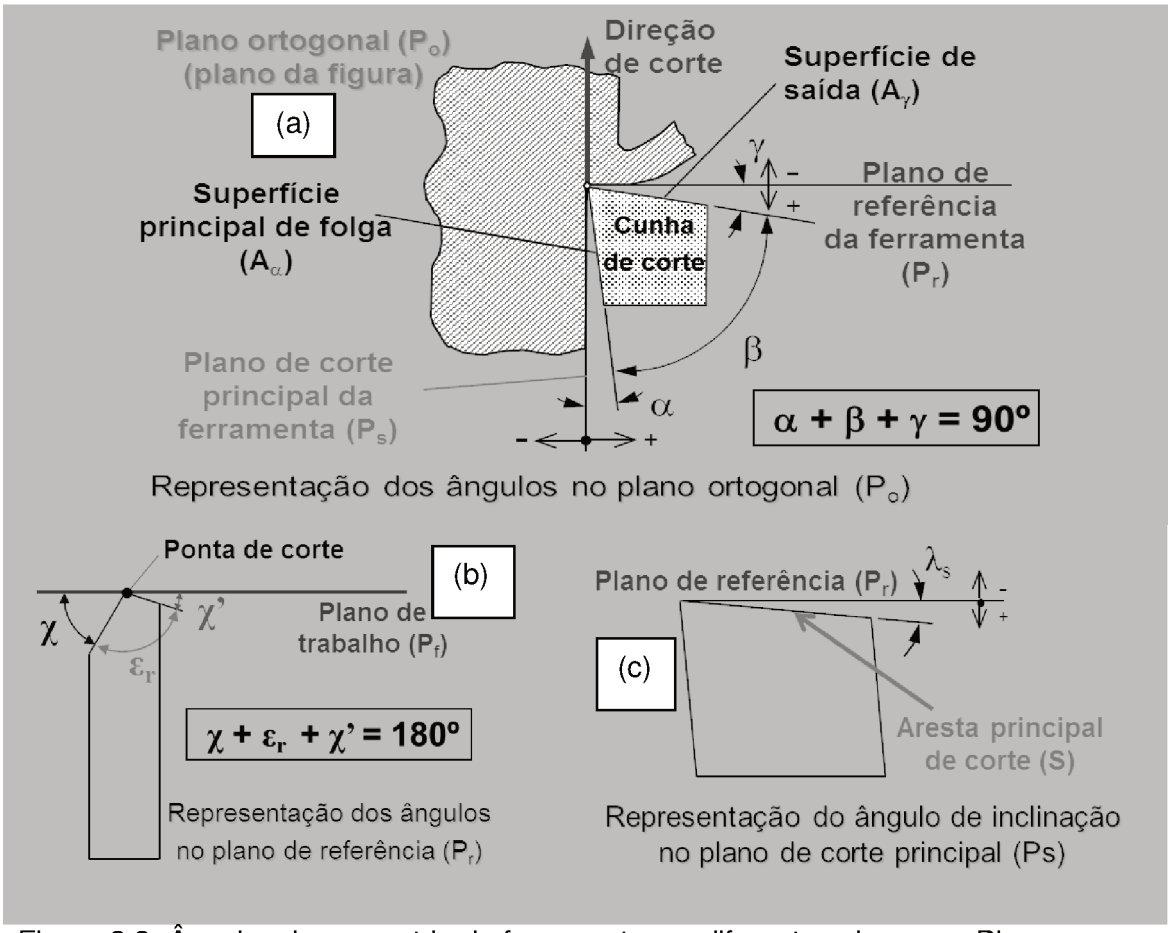


Figura 2.2- Ângulos da geometria da ferramenta em diferentes planos: a- Plano ortogonal (P_o), (b)- Plano de referência (P_r) e (c)- Plano de corte principal (Ps) (FIOCCHI, 2018).

O $\gamma_o$do torneamento convencional influência na força e na potência necessária de corte, no acabamento superficial e no calor gerado. Observa-se experimentalmente que, quanto maior o γ_o, menor o trabalho de dobramento do cavaco. Para determinar o γ_o, é necessário levar em consideração a resistência e o material da ferramenta e da peça a se usinar, a quantidade de calor gerado no corte e a velocidade de avanço. Geralmente um γ_o negativo é usado para peças de difíceis usinabilidade incumbindo à ferramenta uma maior força e potência de usinagem (MACHADO *et al.*, 2015).

Blackley e Scattergood (1991) em um modelo de usinagem utilizaram uma ferramenta de ponta única de diamante em blanques de alumínio para experimentos de microtorneamento. Os autores variaram os γ_o= (0°, -10° e -30°), usando um ε_r= 0,762 µm e α_o= 6°. Os autores concluíram que à medida que o γ_o diminui, pode-se aumentar a profundidade de corte e também o avanço. Afirmam também que γ_o negativos suprime o mecanismo de fratura ao usinar materiais frágeis.

Yan, Zhang e Kuriyagawa (2009) em um experimento de macrotorneamento de carboneto de silício usando duas ferramenta de diamante de ε_r=10 mm, uma com γ_o= 0° e a outra com γ_o= -40°, perceberam que a rugosidade da superfície não foi significativamente afetada pela variação do avanço, mas sim pela alteração de γ_o. Constataram que para a ferramenta com γ_o= -40° a relação de fraturas na peça de trabalho é menor que a ferramenta de γ_o= 0°, explicando que a tensão de compressão causada pelo ângulo negativo da ferramenta restringe o deslocamento dos grãos de SiC e é útil para evitar que os grãos da superfície usinada se soltem.

A escolha adequada do valor do α_o no torneamento convencional minimiza o atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, sendo sempre positivos. Quando esse ângulo possui valor pequeno, próximo a 0, a cunha não penetra o necessário no material, causando grande geração de calor, além de produzir resultados negativos para a integridade superficial da peça. No entanto, quando o α_o possui valores altos, a ferramenta perde em robustez, deixando suscetíveis a trincas e lascamentos (MACHADO *et al.*, 2015). Para um melhor acabamento superficial no macrotorneamento, o efeito do γ_o é mais significativo que o efeito do α_o (AMINI *et al.*, 2008).

Liu e Melkote (2006) apresentaram um modelo para prever a rugosidade da superfície no microtorneamento da liga Al5083-H116 que leva em consideração os efeitos do fluxo plástico (tensões locais nas ferramentas, distribuições de temperaturas na interface cavaco-ferramenta e determina as condições do material da peça após a remoção do cavaco), geometria da ferramenta e parâmetros do processo. Usaram uma ferramenta PCD com ε_r= 800 µm, γ_o= 5°, λ_s= 0° e α_o= 11°. Os autores concluíram que o aumento da rugosidade com a diminuição do avanço é atribuído ao aumento dos efeitos do fluxo plástico lateral causado pelo gradiente induzido que fortalece o material da peça diretamente à frente da ferramenta.

O ε_r no torneamento convencional, influencia a profundidade de corte (a_p) e avanço (f_c), grandezas que se relacionam diretamente no acabamento superficial, quebra de cavacos e resistência da ferramenta de corte. Geralmente menores valores de ε_r são utilizados para profundidades de corte pequenas, melhorando o desempenho do quebra-cavaco e reduzindo as vibrações produzidas. No entanto, com o ε_r maior, por ser mais robusta pode-se usar faixas de avanços maiores e grandes profundidades de corte. Consequentemente, as forças radiais são maiores (SANDIVIK, 2018).

Özel, Karpat e Srivastava (2008) apresentaram investigações na microusinagem com modelos experimentais em materiais duros com insertos de

PCBN. Os autores compararam os efeitos do ε_r variável com o ε_r uniforme conforme apresentado na Fig. 2.3. Constataram que os insertos com raios de ponta variável possuem desempenhos melhores. Afirmaram também que o raio de ponta variável reduz a geração de calor ao longo da aresta de corte e induz uma menor deformação plástica na peça de trabalho usinada.

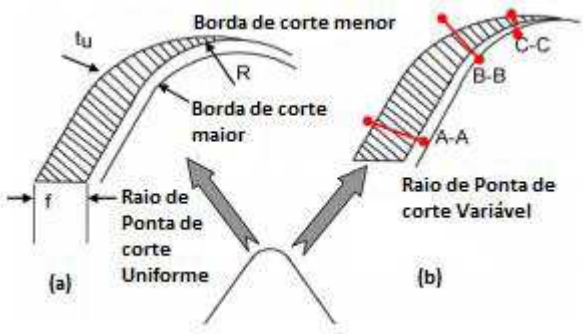


Figura 2.3 - Visualização da ponta de corte do inserto. (a) ε_r uniforme; (b) ε_r variável (adaptado de ÖZEL; KARPAT; SRIVASTAVA, 2008).

Segundo Machado *et al*. (2015), o χ_r no torneamento convencional é capaz de:

- Distribuir as tensões de corte no início e no fim do corte.
- Aumentar o ε_r.
- Aumentar a resistência e a capacidade de dissipação do calor.
- Influir diretamente no cavaco.
- Varia geralmente de 30° a 90°.

Trent e Wright (2000) relatam que λ_s ajuda no escoamento do cavaco. Na prática do torneamento convencional, λ_s é determinado na experiência, uma vez que um ângulo positivo elevado (maior de 30°) dá uma impressão de que a aresta de corte está afiada, porém ela fica mais suscetível a danos. Por isso, os $\lambda_s$nulo ou negativo é em muitos casos preferível, oferecendo à ferramenta maior robustez. Machado *et al.* (2015) afirmaram o que o λ_s controla a direção de saída do cavaco, protege a quina da ferramenta contra impactos e atenua vibrações.

A tensão na superfície de folga da ferramenta tem uma influência muito pequena na formação das rebarbas. O aumento do λ_s da ferramenta conduz a uma mudança favorável do estado de tensão na zona de formação de cavaco, resultando em uma redução considerável das dimensões da rebarba (TOROPOV; KO; KIM, 2005).

De acordo com Toropov, Ko e Kim (2005) quando a espessura da rebarba for relativamente menor que o avanço, a rebarba é cortada em cada revolução da peça e se a espessura da rebarba exceder na velocidade do avanço, tem-se a altura da rebarba proporcional a cada volta da peça de trabalho.

Reis (2000) no torneamento convencional analisou a influência do χ'_r, e $\varepsilon_r$da ferramenta de corte no acabamento superficial (R_a) de peças de aço ABNT 1045, torneadas em condições de usinagens propícias à formação de aresta postiça de corte (APC). Nessas condições o autor constatou que a rugosidade não variou com a alteração doχ'_r nos testes realizados à seco. Ainda nas condições de corte à seco, à medida que ε_r aumentou, diminuiu os valores de R_a.

A Tabela 2.3 apresenta uma síntese resumida das condições de corte no torneamento e sua maior influência.

Tabela 2.3 - Fatores que afetam o corte (FERRARESI,1970; DINIZ, MARCONDES, COPINNI, 2013; MACHADO *et al.*, 2015).

Fator	Maior Influência
Geometria da ferramenta	
Ângulo de saída	Formação do cavaco
Ângulo de folga	Desgaste da ferramenta
Raio de ponta	Rugosidade da superfície de corte
Parâmetro de corte	
Profundidade de corte	Formação do cavaco e rugosidade da superfície de corte
Velocidade de corte	Formação do cavaco e rugosidade da superfície de corte
Taxa de avanço	Formação do cavaco e rugosidade da superfície de corte
Temperatura do ambiente	Geração de calor, aquecimento, derretimento

2.4 Preparação da geometria da ferramenta

Na última década, as pesquisas sobre a preparação da ponta de corte para o microtorneamento aumentaram, objetivando cada vez mais melhorar o processo de corte. Os parâmetros de saída que são influenciados por uma ferramenta preparada são: desenvolvimento do desgaste, vida da ferramenta, forças de cortes e momentos, distribuição da temperatura, formação de cavacos, fluxo e transporte dos cavacos, tensão mantido durante o corte, integridade superficial na peça usinada, exatidão e precisão das dimensões da peça, entre outros. A preparação da ferramenta envolve eliminar os defeitos e as irregularidades causadas pela aresta de corte,

consequentemente define-se a geometria e a microtopografia da aresta de corte, e altera a microestrutura superfície de saída e de folga da ferramenta (RAMESH, 2014).

Na Figura 2.4 é apresentada a diferença entre a ponta de corte somente afiada comparado a ponta de corte preparada.

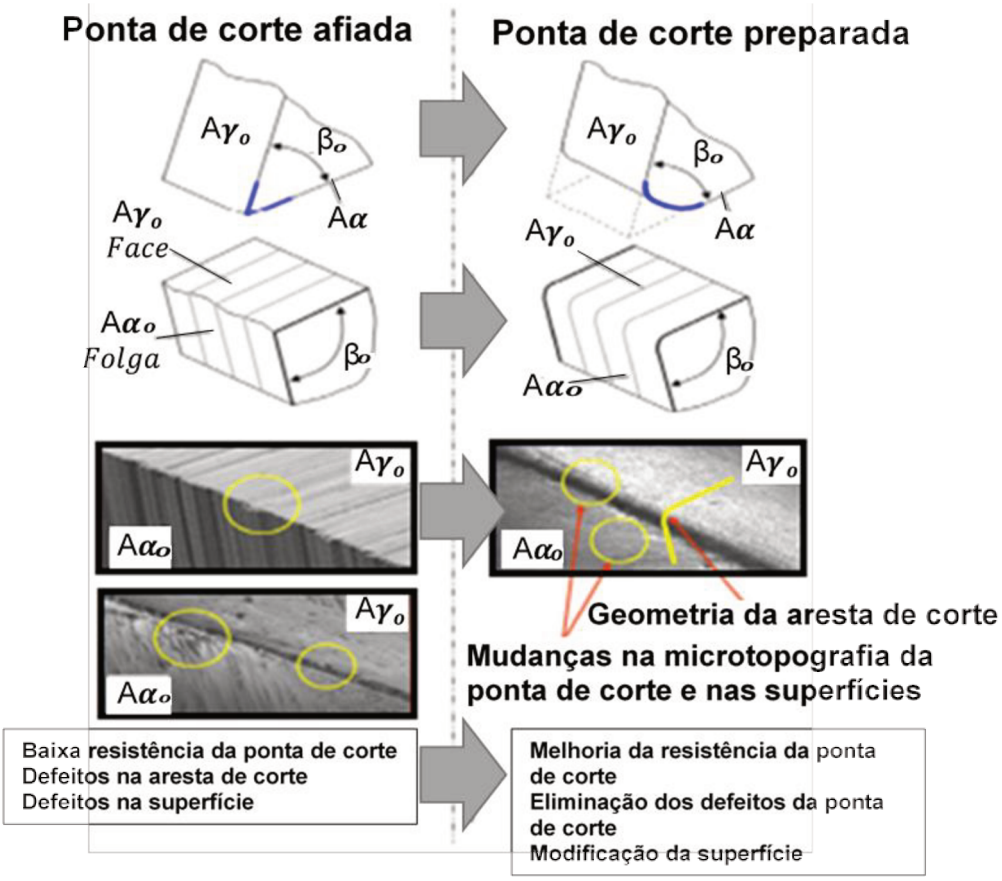


Figura 2.4 - Comparação da ponta de corte afiada com a ponta de corte preparada $A\gamma_o$- Superfície de saída principal, $A\alpha_o$- Superfície de folga principal (adaptado de RAMESH, 2014).

Ramesh (2014) fez experimentos de preparação da aresta de corte em uma máquina que permite a escovação com filamentos de *nylon* contendo abrasivos (*BNAF*), (Al_2O_3, SiC, CBN e diamante) para remover defeitos na aresta de corte por abrasão.

Outra tecnologia é a remoção de material por usinagem eletroquímica (KUMAR, 2016). Geralmente esse processo é utilizado na usinagem de materiais de altíssima dureza e baixa usinabilidade, onde as consequências da usinagem por métodos convencionais mecânicos são negativas, à ponto de descartá-las. A usinagem eletroquímica teve desenvolvimentos de pesquisas significativas por volta

da década de 1950, entretanto foi influente no setor automotivo, petrolífero, indústrias, engenharia médica e empresas aeroespaciais a partir da década de 1990 (Da SILVA, 2011).

O processo de usinagem eletroquímica envolve a dissolução anódica da peça pela ação da corrente elétrica, conduzida pelo eletrólito entre a ferramenta ou eletrodo (cátodo) e a peça (ânodo), em função da diferença de potencial aplicada entre eles (MULLER; ARAÚJO, 1972 *apud* NETO, BUZZATO; REBELLO, 2011).

Como apresentado na Figura 2.5, geralmente, com uma velocidade constante tem-se o cátodo avançando em direção ao ânodo, mantendo a distância entre a ferramenta e a peça, visto que a forma final adquirida pela usinagem eletroquímica é a forma aproximadamente complementar a da ferramenta (KOPELIOVICH, 2013 *apud* AOSANI, 2014). Ademais, o movimento que acompanha a passagem de corrente através do eletrólito é caracterizado pelos cátions deslocando-se em direção ao cátodo e os ânions em direção ao ânodo, enquanto na interface metal-eletrólito ocorre a oxidação do material da peça e a transferência dos átomos do metal para o eletrólito, na forma de íons (BENEDICT, 1987 *apud* AOSANI, 2014).

Os íons produzidos, no caso de o eletrólito ser uma solução aquosa de NaCl, são H^+, Na^+, Cl^- e OH^- e, como representado nas equações presentes na Fig. 2.5, no cátodo o íon H^+ recebe elétrons, gerando o gás H_2, enquanto no ânodo o metal cede elétrons, tornando-se um íon positivo, o qual irá reagir com o cátion mais eletronegativo presente, que no caso é o OH^- (RUSSELL, 1994; NETO; SILVA; MALAQUIAS; 2001). Além disso, dentre os parâmetros do processo destacam-se a área frontal do eletrodo (S), corrente elétrica (A) e taxa de remoção específica do material (q_u).

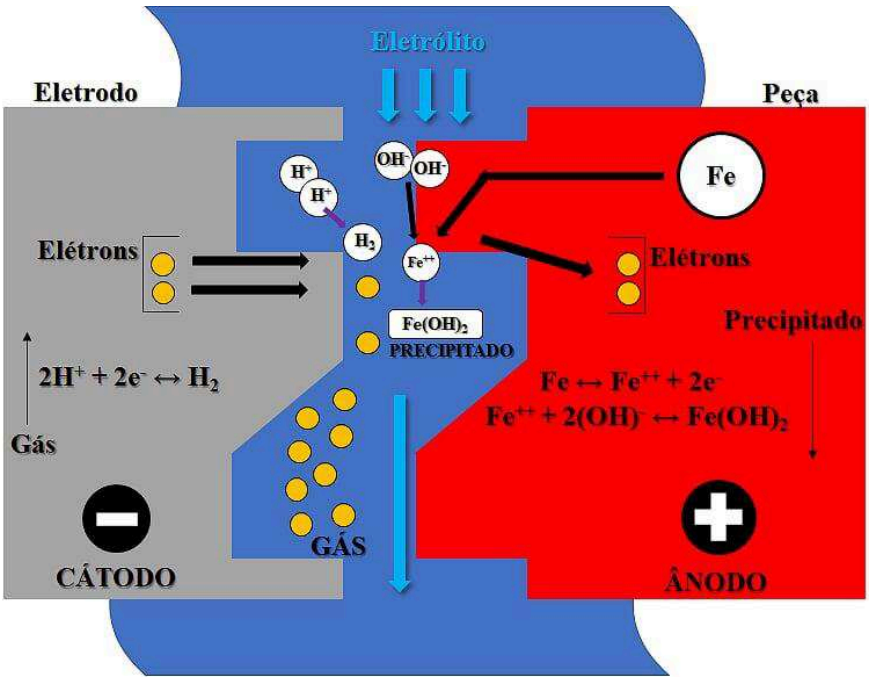


Figura 2.5 - Representação esquemática do processo de usinagem eletroquímica de uma peça de ferro puro em solução de água e NaCl (adaptado de FERREIRA *et al.*, 2017).

Neto *et al*. (2003) comentaram que materiais de baixa usinabilidade necessitam de uma grande taxa de energia para remoção do cavaco, podendo elevar a temperatura e comprometer a interface peça-ferramenta. Para evitar problemas desse contato mecânico entre a peça e a ferramenta pode-se usinar com a eletroquímica, onde a remoção de material é feita por reações eletroquímicas.

O processo de usinagem eletroquímica é usado para desbaste, obtenção de superfícies menos rugosas, furos, perfis de forma complexa, remoção de trincas de fadiga em estruturas de aço, afiação de ferramentas, rebarbação, entre outros (RAJURKAR *et al*., 2006; NETO; BUZZATTO; REBELLO, 2011; Da SILVA, 2011).

As vantagens da usinagem eletroquímica são (EMAG, 2018):

- Baixo desgaste da ferramenta (cátodo).
- Rugosidades $R_a \geq 0{,}05$ µm.
- Usinagem de precisão.
- Não possui efeitos térmicos ou alteração nas propriedades da peça.
- Dureza e as qualidades magnéticas das peças de trabalho se mantém.
- Possibilidade de usinar contorno e paredes finas.
- Alto grau da precisão dimensional.
- Boa repetibilidade do processo.

- Processo simples e eficiente.
- Possibilidades de usinar macro e microestruturas.
- Dureza da peça não influencia (porém deve ser condutor elétrico).

Neto, Buzzatto e Rebello (2011) fizeram a rebarbação do aço SAE 4144 forjado com usinagem eletroquímica, tendo como eletrólitos o cloreto de sódio (NaCl) ou o nitrato de sódio ($NaNO_3$) variando a concentração de 5 % a 20 % no volume da cuba eletrolítica. Após vários testes e análise de resultados preliminares definiu os melhores parâmetros para tal processo de rebarbação. Os parâmetros avaliados foram tensão de 14 VDC, corrente elétrica de ±45 A, condutividade elétrica do eletrólito de 175 mS, temperatura do eletrólito de 45 ºC, pressão de eletrólito de 6 bar e tempo de ciclo de usinagem de 45 s.

Da Silva *et al.* (2001) fizeram comparações entre os eletrólitos de NaCl e $NaNO_3$ na usinagem eletroquímica do aço rápido ABNT M2. O potencial elétrico selecionado para a realização dos ensaios eletroquímicos com $NaNO_3$ (300 g/l) foi 2,30 V (região de transpassivação). Já em soluções de NaCl (100 g/l) o potencial foi 2,32 V. Neste caso, percebeu-se que a corrosão iniciou a partir de -0,30 V. Notaram que, diferentemente do eletrólito de $NaNO_3$ (300 g/l), as curvas de corrosão em eletrólitos de NaCl (100 g/l) não apresentaram regiões de potencial onde ocorre a completa passivação do eletrodo. A diferença de comportamento entre os dois tipos de eletrólitos está ligada às propriedades complexantes do Cl^- o qual, aparentemente, impede a passivação completa do eletrodo. Enfim, perceberam que em baixos potenciais, ocorreram a corrosão seletiva do aço rápido ABNT M2, consequentemente, prejudicou o acabamento superficial das peças usinadas e que, eletrólitos de NaCl produzem regiões mais corroídas que eletrólitos de $NaNO_3$. A correta seleção dos parâmetros de usinagem evita as possibilidades de as regiões secundárias serem corroídas.

Da Silva *et al.* (2001) usinaram o aço ABNT M2 por usinagem eletroquímica comparando o eletrólito de NaCl com o eletrólito de $NaNO_3$ e afirmaram que a taxa de remoção de material não foi influenciada significativamente pela variação dos valores de pH do eletrólito. Analisaram também que em potenciais iguais ou superiores a 10 V, a solução de $NaNO_3$ (300 g/l) apresentou maior taxa de remoção de material que a solução de NaCl (100 g/l) e afirmaram que os eletrólitos com pH neutros e básicos apresentaram os menores valores de R_a, tendo o eletrólito de $NaNO_3$ (300 g/l) melhor acabamento superficial comparado à solução de NaCl (100 g/l). Para o uso de tensões

inferiores à 10 V não é recomendado maiores tempos de usinagem, pois a peça é suscetível a corrosão seletiva do material.

Neto *et al.* (2003) compararam os efeitos da taxa de remoção de material e rugosidade de dois tipos de eletrólito, NaCl e $NaNO_3$ e comprovaram que o primeiro apresentou R_a maior do que o segundo. Concluíram que para uma maior taxa de remoção de material, com parâmetros similares, o NaCl é melhor que o $NaNO_3$.

Neto *et al.* (2003) afirmaram que a solução de NaCl é um eletrólito que pode dificultar a usinagem eletroquímica pois há o risco de provocar um curto-circuito entre a peça e a ferramenta. Constataram também que quando a tensão da fonte de potência e a vazão do eletrólito foram alterados, não houve influência significativa na taxa de remoção do material.

Em estudos da usinagem eletroquímica de uma válvula de aço SAE-XEV-F variando os parâmetros de avanço, eletrólito, avanço do eletrodo e tensão elétrica, Neto, Da Silva e Da Silva (2007) chegaram à conclusão que quanto maior o avanço da ferramenta, maiores a remoção de material e a rugosidade da superfície usinada da peça, por hora, o avanço mais lento causa remoção irregular do material.

Sobre a microusinagem eletroquímica (ECMM - *Electro chemical micro machining*), Bhattacharya e Munda (2003) variaram os parâmetros de ajuste da máquina e constataram que quanto maior a tensão elétrica ou a concentração de eletrólito, maior a taxa de remoção de material.

Sugihara e Enomoto (2017) reconhecem a importância da texturização das superfícies na ferramenta de corte como método de melhorar as propriedades tribológicas durante a usinagem. Fizeram microcrateras ou microsulsos na superfície de saída de uma ferramenta de metal duro com um *laser* femtosegundo. Ao compararem os resultados que essas texturas produziram nas peças, constataram que a textura em forma de crateras retém o lubrificante e diminui o atrito entre o cavaco e a ferramenta. Já os microssulcos escoam o lubrificante da superfície, aumentando o coeficiente de atrito nas superfícies da ferramenta. Esses resultados apresentam que a superfície texturizada com microcrateras melhora a resistência ao desgaste de cratera da ferramenta, servindo como um microrreservatório para um fluído de corte e consequentemente, uma microarmadilha para detritos de desgaste.

As ligas de alumínio são materiais fáceis de usinar, mas devido à sua baixa lubricidade contra a superfície da ferramenta de corte, é evidenciada a adesão na maioria dos processos de corte. Com base nisso Sugihara e Enomoto (2009), usando da tecnologia *laser* femtosegundo (*Femto-second*) fizeram nano/microssulcos e microranhuras na superfície de saída de uma ferramenta de metal duro a fim de usinar

o alumínio. Os autores constataram que as microrranhuras paralelas à aresta de corte principal, favoreceram a antiadesão, mas não foi suficiente para eliminar a adesão na superfície da ferramenta de corte. Também afirmaram que a microtextura realizada na superfície saída da ferramenta de corte realizado à seco aumentou a aderência dos cavacos do alumínio, porém com uso de lubrificação houve menor aderência. A lubrificação é retida na superfície de saída texturizada, melhorando os efeitos antiadesivos.

2.5 Efeito Escala

O termo efeito escala ou *size effect* na usinagem é definido como um crescimento não linear da energia específica de corte com a redução da espessura do material a ser cisalhado (ARAMCHAROEN, MATIVENGA, 2009; KOÇ; ÖZEL, 2011; DING; SHEN; SHIN, 2011). Quando a região de corte possui ordem de grandeza micrométrica ou submicrométricas, ou seja, com dimensões próximas ao tamanho ou menores que os grãos da microestrutura do material da peça, a resistência ao cisalhamento (τ) e a energia específica de corte (δ) tornam-se extremamente elevadas (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006; CHEN; HUO, 2013). A razão para a resistência ao cisalhamento se deve à existência de apenas defeitos pontuais para iniciar a quebra da ligação atômica da estrutura (MIAN, DRIVER e MATIVENGA, 2011).

A energia específica de corte é a quantidade de energia requerida para remover uma unidade de volume de cavaco ou a potência de corte relativa à taxa de remoção de material, ou ainda a força de corte por unidade da área da seção de corte (FURUKAWA; MORONUKI, 1988; OLIVEIRA, 2012).

O efeito escala, principalmente relacionado à microestrutura do material da peça e à escalabilidade limitada da geometria da ferramenta e da topografia da superfície, influenciam criticamente o desempenho do processo em termos de precisão da peça, rugosidade da superfície, forças de corte e desgaste da ferramenta (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005; LIU; MELKOT, 2006).

O efeito escala, principalmente relacionado à microestrutura do material da peça e à escalabilidade limitada da geometria da ferramenta e da topografia da superfície, influenciam criticamente o desempenho do processo em termos de precisão da peça, rugosidade da superfície, forças de corte e desgaste da ferramenta (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005; LIU; MELKOT, 2006; OLIVEIRA, 2012).

A microestrutura do material pode provocar variações na espessura do cavaco, em função de alterações no ângulo de cisalhamento de cada grão (POPOV *et al.,*

2006). A remoção do material em metais é dividida em três etapas consecutivas, a deformação elástica, logo em seguida tem-se a deformação plástica e finalmente a remoção de material. No corte de materiais policristalinos, o movimento contínuo de deslocamento é impedido pelo limite dos grãos. Quanto menor o tamanho dos grãos, maior a presença dos limites dos grãos e maior o efeito de inibição do movimento dos grãos. Assim os materiais com um tamanho de grão menor apresentam maior resistência material e uma maior resistência à deformação (WU *et al.,* 2016).

A Figura 2.6 apresenta a influência do efeito escala no mecanismo de formação de cavaco para diferentes valores de h (ARAMCHAROEN, MATIVENGA, 2009).

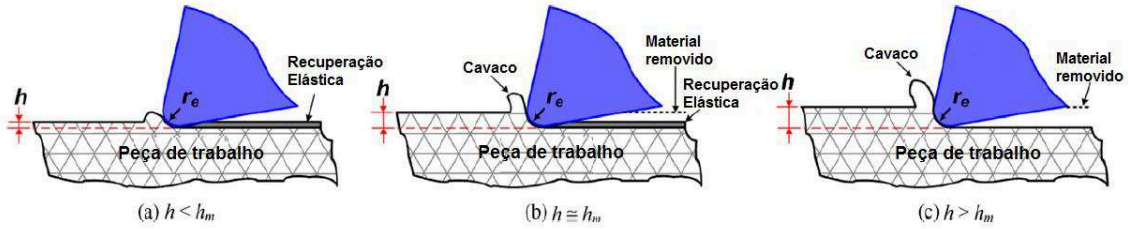


Figura 2.6 - Formação do cavaco para diferentes espessuras de cavaco na microusinagem caracterizando o efeito escala. (adaptado de ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

Quando a espessura do cavaco ainda não formado (h) é menor que a espessura mínima do cavaco (hm), mostrado na Fig. 6a, o material da peça será comprimido pela ferramenta de corte. O material forçado se recupera após a passagem da ferramenta (deformação elástica) e não há formação de cavaco. Na Figura 6b quando o h=hm, o cavaco começa a se formar com uma porção de deformação e recuperação elástica, porém a quantidade de material removido é inferior à desejada. Na figura 2.c o cavaco é formado como se deve (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

O efeito escala é presente tanto na microusinagem, quanto na macrousinagem. Neste, pode ser assumido não significativo pela razão ponta de corte e espessura de corte ser maior que a unidade. Naquele caso, é significativo, pois a razão raio de aresta e espessura de corte é maior que a unidade. Razões próximas à unidade sugerem um comportamento chave na usinagem em microescala, uma vez que pode determinar a rugosidade da superfície usinada mínima para a energia específica de corte máxima. Esse comportamento permite determinar o raio de aresta da ferramenta de modo indireto (OLIVEIRA, 2012).

Nos primeiros estudos da microusinagem, geralmente foram usados corpos de prova de composto de materiais macios e puros, e surgiu interesse de estudar os efeitos do microcorte em materiais heterogêneos e com maior dureza. Por esse motivo Simoneau, Ng e Elbestawi (2007) estudaram a microusinagem do aço AISI 1045 em corpos de prova que passaram por processos térmicos de normalização e refinamento de grãos, com a intenção de analisar a influência do tamanho do grão no processo de microusinagem. A partir dos resultados tiveram conclusões que a microestrutura influencia na formação do cavaco e na formação dos defeitos superficiais.

A microestrutura do material pode provocar variações na espessura do cavaco, em função de alterações no cisalhamento de cada grão (POPOV *et al.,* 2006).

Wu *et al.,* 2016 prepararam duas amostras de barras cilíndricas de cobre de 6 mm de diâmetro, uma amostra com tamanho médio de grãos de 20 µm e a outra com 60 µm torneando com uma ferramenta de PCD com γ_o = 10° e α_o = 5°. Constataram que um tamanho de grão menor resulta em uma maior força de corte e maior energia específica de corte. Concluíram também que a influência do tamanho de grão do material na força de corte e na energia de corte específica é de 28,2 % e 17,7 %, respectivamente.

2.6 Acabamento Superficial

Os parâmetros de corte, a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, a rigidez da máquina-ferramenta, o material da peça e as condições de corte da ferramenta exercem influência no acabamento superficial do material usinado. A rugosidade é menor quando deflexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são relativamente pequenas, a ponta da ferramenta não é aguda, a ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas (evitar desvios), o material da peça é inerentemente puro, livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões), o eixo principal da máquina-ferramenta está corretamente alinhado, as guias sem desgastes, a aresta de corte sem quebras e corte sem APC (ASTAKHOV, 2010;).

Kiswanto, Zariatin e Ko (2014) afirmaram que o aparecimento de APC influencia na rugosidade da peça, porque se acumula na aresta de corte, muda a geometria da ferramenta e consequentemente altera-se os resultados. Os autores também afirmaram que quando há lascamentos ou desgastes severos na aresta de corte, também há interrupção da formação e do crescimento de APC.

Liu e Melkote (2006) fizeram um modelo experimental de microusinagem para identificar o efeito do fluxo plástico lateral no aumento da rugosidade superficial da peça variando os parâmetros de microusinagem. Os autores usaram no microtorneamento da liga de alumínio Al5083-H116 uma ferramenta PCD com ε_r= 800 nm. Concluíram que para avanços menores, depois de atingir um valor mínimo, há um aumento da rugosidade, sendo atribuído pelo aumento do fluxo lateral plástico causado pelo fortalecimento induzido e pelo gradiente de deformação do material diretamente à frente da ferramenta.

Um dos fatores que contribui para piorar a rugosidade da superfície usinada é a alta afinidade das ligas de alumínio à maioria das ferramentas. Roy *et al*. (2009) no torneamento do Al-puro (12% Si) com ferramentas de WC + 6 % Co e WC + 6 % Co revestidas com TiC, TiN, TiN, TiB_2, Al_2O_3 e AlON, registraram grande acúmulo de material aderido. Dessa forma, houve o aparecimento da APC instável e a rugosidade foi comprometida.

Sreejith (2008), no torneamento da liga de alumínio 6061, constataram que quando o material aderido na ferramenta se solta, impregna na superfície usinada, causando prejuízos ao acabamento superficial da peça durante o tempo de corte. O autor também afirmou que em todas as condições de corte, a utilização de fluído de corte melhorou a rugosidade significativamente.

Coldwell *et al.* (2004) sugerem a utilização de ferramentas de corte altamente polidas, ou seja, com a rugosidade baixa na superfície da ferramenta, pois facilita o fluxo do cavaco, e, portanto, inibe o aparecimento de APC. Uma forma de melhorar o acabamento é usar fluídos lubrificantes, ferramentas afiadas, altas velocidades de corte, baixos avanços e revestimentos da ferramenta por diamante ou diamante policristalino. Todas essas medidas são facilitadoras para formação do cavaco (WALSH; COMIER, 2006).

Da Silva (2010) no processo de melhor escolha dos parâmetros de corte escolheu a_p= 300 µm e o f_c= 25 µm para a peça de liga de alumínio BS EN AW-2011 com microtorneamento à seco. O autor também constatou que a afiação da ferramenta de corte com rebolo abrasivo deteriora a rugosidade superficial. Uma forma de analisar a rugosidade com diferenças velocidades de corte é através do eixo escalonado apresentado na Fig. 2.7.

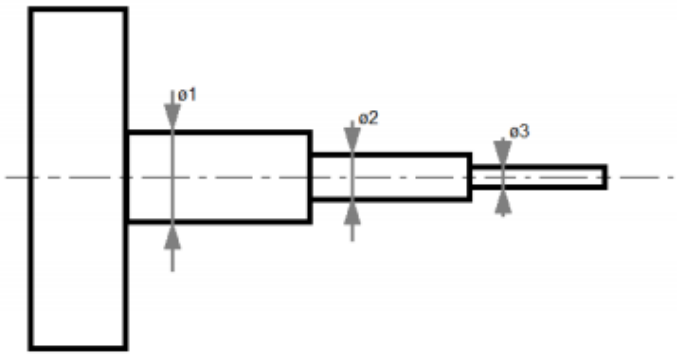


Figura 2.7 - Eixo escalonado (adaptado de Da Silva, 2010).

Sato *et al.* (1991) realizaram o microtorneamento do alumínio puro (99,99 %) com ferramenta de ponta única de diamante, cuja geometria é: γ_o= 3°, α_o= 3°, ε_r= 10 nm e parâmetros de corte: Vc= 1 m/min, a_p= 0,5 µm a 3 µm. Constataram que o efeito escala aconteceu quando a profundidade de corte atingiu 1 µm, deteriorando a rugosidade superficial.

2.7 Ferramentas de Corte

As ferramentas e porta-ferramentas de usinagem são importantes para conseguir obter peças de reduzidas dimensões com uma boa qualidade superficial e precisão dimensional. Atualmente, há um gama de ferramentas disponíveis no mercado, porém, para a microusinagem a oferta é mais limitada. Muitos experimentos não utilizam essas ferramentas apropriadas e acabam fazendo uso de ferramentas convencionais para experimentos de microusinagem (AUTOR).

Quanto menor a ferramenta, melhor a capacidade de fabricar componentes precisos. Como a produtividade é limitada pelo desgaste dessas ferramentas e pela facilidade de ruptura das ferramentas, são necessárias ferramentas com melhores características de resistência ao desgaste, maior rigidez e amortecimento para ampliar a flexibilidade da definição dos parâmetros operacionais de usinagem, minimizando a instabilidade. A tentativa de produzir ferramentas não tradicionais abaixo de 50 µm acompanham processos caros de fabricação como por exemplo o feixe de íons focalizados. Assim como as microferramentas precisam ser inovadas frequentemente, novos métodos para fabricá-las com alto custo-benefício, é uma necessidade (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Na usinagem em macroescala a remoção de material compreende vários grãos do material, enquanto na microusinagem, os cavacos são formados em um ou em poucos grãos de uma vez. Materiais homogêneos e com menores tamanhos de grão proporcionam menores forças de corte, consequentemente, melhores rugosidades superficiais (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005).

Muitas vezes não há condições de atingir a velocidades de cortes devido ao aumento excessivo da temperatura, que vai além da temperatura na usinagem convencional. Assim o material, revestimento e a geometria da ferramenta são fatores importantes para definir o desempenho do processo (ZIBEROV *et al.,* 2016).

2.8 Desgaste da ferramenta

O desgaste nas ferramentas de corte é relevante para todos os processos de usinagem com contato direto da ferramenta com a peça. Seria perfeito se uma ferramenta durasse para sempre, porém a ocorrência de avarias (lascamento, quebra ou trincamento) e desgaste, comprometem a vida da ferramenta. Ambos podem atingir proporções elevadas e comprometer os resultados esperados (SHAW, 1986; JUNIOR, 1998; MACHADO *et al*., 2015).

Os mecanismos de desgaste possíveis em uma ferramenta de corte são: adesão, abrasão, químico, fadiga da superfície e oxidação. Esses mecanismos podem atuar na maioria das vezes em conjunto e raramente isoladamente. A Figura 2.12 apresenta os principais mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte, da velocidade de corte e outros fatores do processo de usinagem (SHAW, 1986; FERRARESI, 1977; KÖNIG; KLOCKE, 1997; JUNIOR, 1998; SANTOS; SALES, 2007; ALMEIDA, 2010; MACHADO *et al.,* 2015).

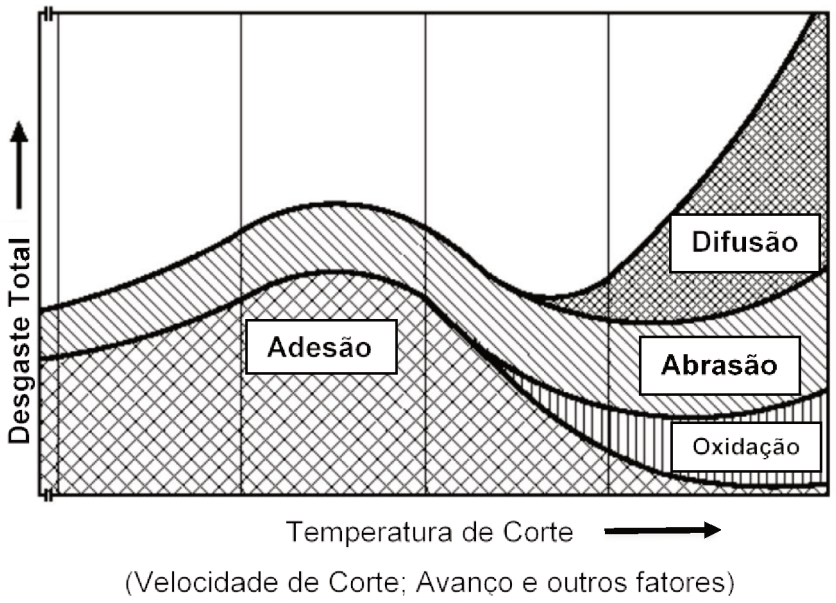


Figura 2.12- Principais mecanismos de desgaste no processo de usinagem (adaptado de KÖNIG; KLOCKE, 1997 apud ROHLOFF, 2012).

Os mecanismos de difusão, adesão, difusão e oxidação são apresentados em função da temperatura de corte ou da velocidade de corte, avanço e outros fatores. A adesão e abrasão são predominantemente causadores de desgaste a baixas temperaturas. A difusão em alta temperatura cresce exponencialmente (SANTOS E SALES, 2007).

Na Figura 2.13 são apresentados os parâmetros utilizados pela norma ISO 3685 (ISO, 1993) para quantificar esses desgastes. Os principais são profundidade de cratera (KT= = 0,06 + 0.3f), desgaste de flanco médio (VB_B= 0,3 mm) e desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$= 0,6 mm).

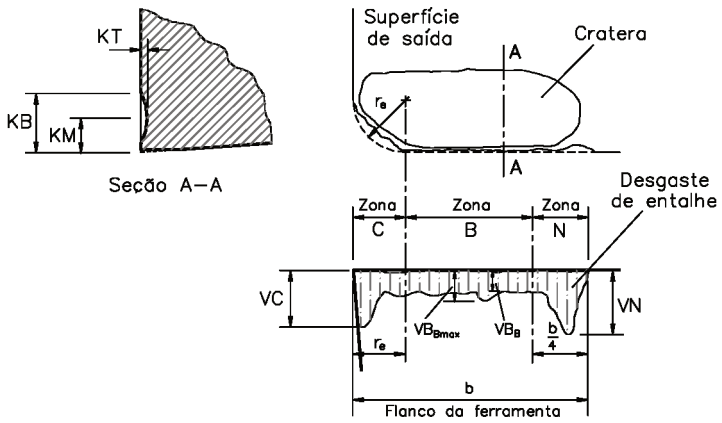


Figura 2.13 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (ISO, 1993).

Os valores de desgaste de flanco são sugeridos pela ISO 3685 (ISO,1993), mas podem assumir valores diferentes, quando considerados os parâmetros de corte de cada processo de corte (MACHADO, 2015).

A adesão e a abrasão são mecanismos de desgaste com maior ocorrência nas ferramentas e geralmente são encontrados simultaneamente, possuindo uma alternância de intensidade entre os dois mecanismos (JUNIOR, 1998).

O VB_B tem influência direta do α_o da ferramenta, uma vez que ele tem a função de evitar o contato excessivo entre a peça e a ferramenta. A norma ISO 3685 (1993) define o VB em “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”. Quando a ferramenta é submetida a usinagem, esse desgaste acontece de maneira contínua e progressiva (MACHADO et al., 2015).

Alta velocidade de corte é condição para agravar o desgaste de flanco da ferramenta de corte. Esse tipo de desgaste é considerado o mais comum e atua diretamente no acabamento superficial na peça usinada (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2010).

O desgaste da ponta da ferramenta se trata de um sistema tribológico e no decorrer dos ensaios haverá um desgaste da ponta ou da superfície de saída da ferramenta, sempre diferentes dos ensaios anteriores (NOVAES; SOUZA, 2009).

Gorla (2015) torneou uma liga de alumínio da classe 6005 utilizando ferramenta cerâmica e afirmou que o aumento significativo da temperatura diminui a resistência mecânica do material da ferramenta e ocasiona os desgastes. Na Figura 2.14 é apresentado o desgaste na ferramenta.



Figura 2.14 - Adesão de alumínio na ferramenta indicado com círculo (GORLA, 2015).

Novaes e Souza (2009) constataram por meio de MEV apresentado na Figura 2.15 a adesão de material na ferramenta de corte de aço rápido de γ_o= 26° e α_o= 8° quando torneou uma liga de alumínio (97,883 % de Al, 1,674 % de Mg, 0,274 % de Si, 0,089 % de Mn e 0,079 % de Cu).

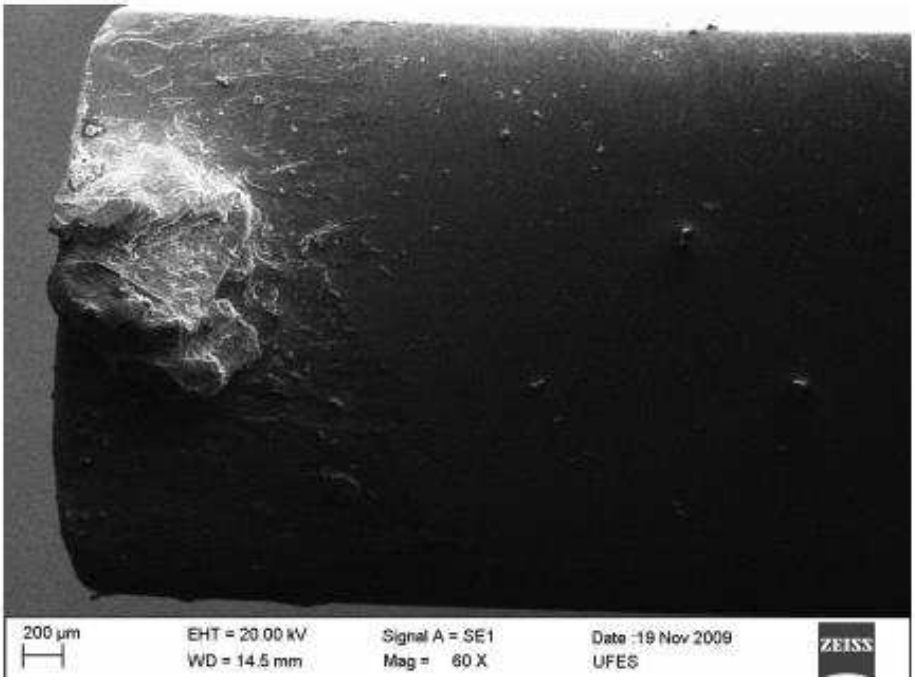


Figura 2.15 - Imagem de MEV da superfície de saída da ferramenta (NOVAES; SOUZA, 2009).

O alumínio submetido ao torneamento com ferramenta de aço rápido vai encruando e formando uma espécie de quebra-cavaco na ferramenta, e fará com que o raio de curvatura do cavaco seja menor, tendo em vista que o alumínio aderido à superfície de saída da ferramenta torna-se uma restrição a passagem do cavaco (NOVAES; SOUZA, 2009).

Na usinagem, com a presença de APC sendo estável, tem-se camadas de material aderido que protegem a superfície de saída da ferramenta. Assim a adesão e abrasão provocam o desgaste da ferramenta na superfície de folga, por onde partes da APC se arrastam nesta superfície. Quando a APC é instável há predominância de adesão e de arrastamento de micropartículas que acelerará o desgaste da superfície de saída (MACHADO *et al.*, 2015).

Klocke e Kratz (2005) investigaram o impacto da ferramenta PCBN em uma modelagem e em uma abordagem experimental. Os autores constataram que o torneamento de precisão é influenciado negativamente pelo desenvolvimento do

desgaste de cratera na ponta da ferramenta. O colapso súbito das arestas de corte da ferramenta de PCBN é diretamente relacionado com o desgaste de cratera da ferramenta, enfraquecendo a ferramenta de corte. Os parâmetros de corte utilizados pelos autores foram: velocidade de corte de 140 m/min, γ_o de -6° e α_o de 6°. O ε_r foi variado de -10° a -60° e a largura de corte de 0,05 mm a 0,50 mm.

2.9 Analise do Cavaco

A formação de cavaco é determinada quando a ferramenta recalca um volume de material da peça. A formação do cavaco se baseia em 4 processos distintos. O primeiro processo é quando o volume do material recalcado começa a desenvolver deformações elásticas, logo em seguida, o material passa a se deformar plasticamente. O segundo processo é tido pela deformação plástica que continua acontecendo até que as tensões não sejam suficientes para manter este regime, passando para o terceiro processo, que é a zona de cisalhamento primária. Ainda dentro dessa zona de cisalhamento primária, o avanço da ferramenta faz com que as tensões ultrapassem o limite de resistência do material, promovendo a ruptura, iniciando a abertura de uma trinca, que pelo material da peça definirá se o cavaco será contínuo ou descontínuo. Por fim, após a ruptura, o cavaco movimenta-se sobre a superfície de saída da ferramenta, como componente ou lamela de cavaco. Os dois últimos processos do mecanismo de formação de cavaco estão representados na Fig. 2.16 (FERRARESI,1970; TRENT, 2000; MACHADO *et al.*, 2015).

Sousa e Novaes (2009) identificaram o risco ao operador quando ao tornear o alumínio o cavaco enrolou em torno da peça, comprometendo o acabamento e gerando danos na ferramenta.

O grau de recalque é medido com a intensão de quantificar a deformação dentro da zona de cisalhamento primária (FERRARESI, 1970; TRENT, 2000; MACHADO *et al.*, 2015).

O grau de recalque, R_c, é definido pela Eq.(2.1):

$$R_c = \frac{h'}{h} = \frac{V_C}{V_{cav}} \tag{2.1}$$

onde: h é espessura de corte ($h = f_C \times \text{sen}\chi_r$), h' é a espessura do cavaco, V_c é a velocidade de corte e V_{cav} é a velocidade de saída do cavaco.

Sousa *et al.* (2013) decidiram analisar várias ligas de alumínio usinadas por uma ferramenta de metal duro com o (γ_o= 15°, de folga = 10° e χ_r= 90°). Constaram

que as variáveis que mais influenciaram nos valores do grau de recalque foram a dureza e o avanço lineares, e as interações dureza e profundidade, bem como entre a profundidade e o limite de resistência.

Gonçalves (2012) afirmou que a liga de 6063 quando foi torneada com ferramenta de metal duro, apresentou maiores valores de deformação do cavaco, comparado às demais ligas torneadas, pois apresentara menor dureza. Já a liga que apresentou maior resistência à tração, apresentou maior grau de recalque.

O aumento do avanço causa redução da influência do raio de curvatura do cavaco e a diminuição do γ_o da ferramenta, promove o aumento do R_c, e consequentemente diminuição do ângulo de cisalhamento (ϕ), e uma redução da velocidade de saída do cavaco (SOUZA; NOVAES, 2009).

A formação do cavaco é influenciada por amplos fatores que envolvem a usinagem em si. São alguns desses fatores: material da ferramenta, ângulos da ferramenta, geometria de ponta (podendo variar pelo desgaste, a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e o ambiente de usinagem (desvios de máquinas-ferramentas, fluido de corte e assim por diante) (TRENT, WRIGHT, 2000). A Figura 2.17 ilustra os principais fatores que influenciam na forma final do cavaco em processos de usinagem de uma maneira geral.

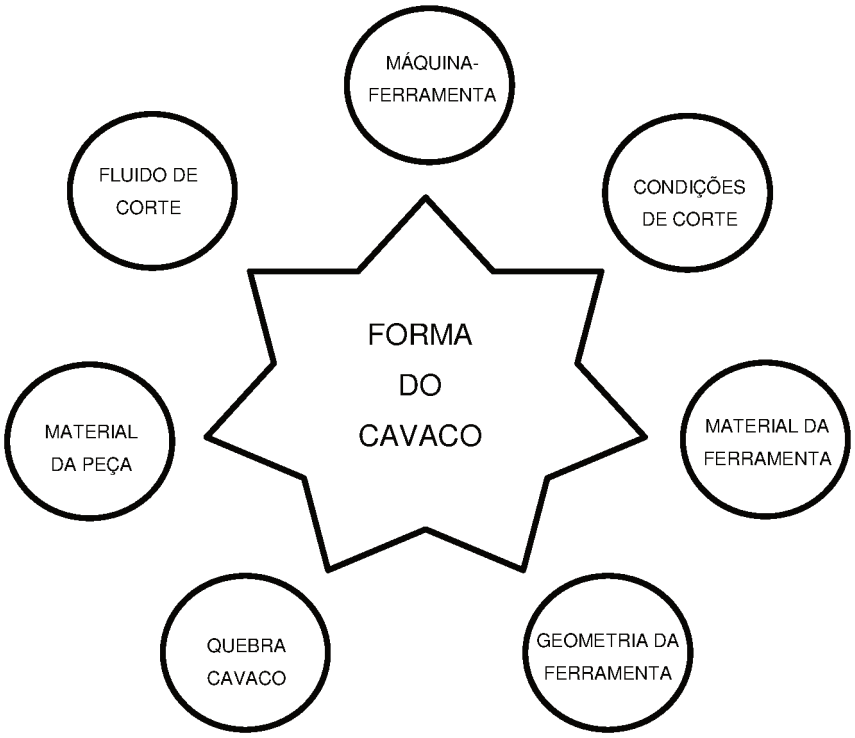


Figura 2.17 - Fatores que influenciam na forma do cavaco (adaptado de NOVAES; SOUZA, 2009).

2.10 Alumínio AA1100

As ligas de alumínio possuem excelente relação resistência-peso, boa ductilidade, baixa densidade, excelente condutividade térmica e elétrica e resistência à corrosão (SOUZA *et al.,* 2013).

O alumínio, o segundo elemento metálico mais abundante na terra tornou-se um concorrente econômico para com os demais metais em aplicações de engenharia no final do século XIX (METALS HANDBOOK, 1989).

O alumínio e suas ligas possuem ponto de fusão baixos. Desta forma, os mecanismos de desgaste ativados termicamente são menos evidenciados nas ferramentas de corte que a adesão e a abrasão (GONÇALVES, 2012).

Ao comparar as ligas de Alumínio com os aços, observa-se 1/3 da sua densidade e módulo de elasticidade, alta condutividade térmica e elétrica, alto coeficiente de atrito com uma excelente conformabilidade, baixo ponto de fusão, alta resistência a corrosão, alta neutralidade magnética e amplo espectro de possibilidades de tratamentos superficiais (DINIZ *et al,* 1999).

A Tabela 2.5 apresenta as propriedades físicas da liga de alumínio AA1100.

Tabela 2.5 – Propriedades físicas da liga de alumínio AA1100 (IMPERIO DOS METAIS, 2018).

Condutibilide Térmica (I.A.C.S)	Condutibilidade Elétrica (cal/cms℃)	Densidade (g/cm³)	Expansão térmica ($x10^{6/℃}$)	Modulo de elasticidade (MPa)	Ponto de Fusão (℃)
0,52-0,56	56 %	2,71	24	64000-69000	658

A Tabela 2.6 apresenta as propriedades mecânicas da liga de alumínio AA1100.

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AA1100 (IMPERIO DOS METAIS, 2018).

Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Têmpera (D)
90 - 142	93 - 115	3 - 9	32	1/2

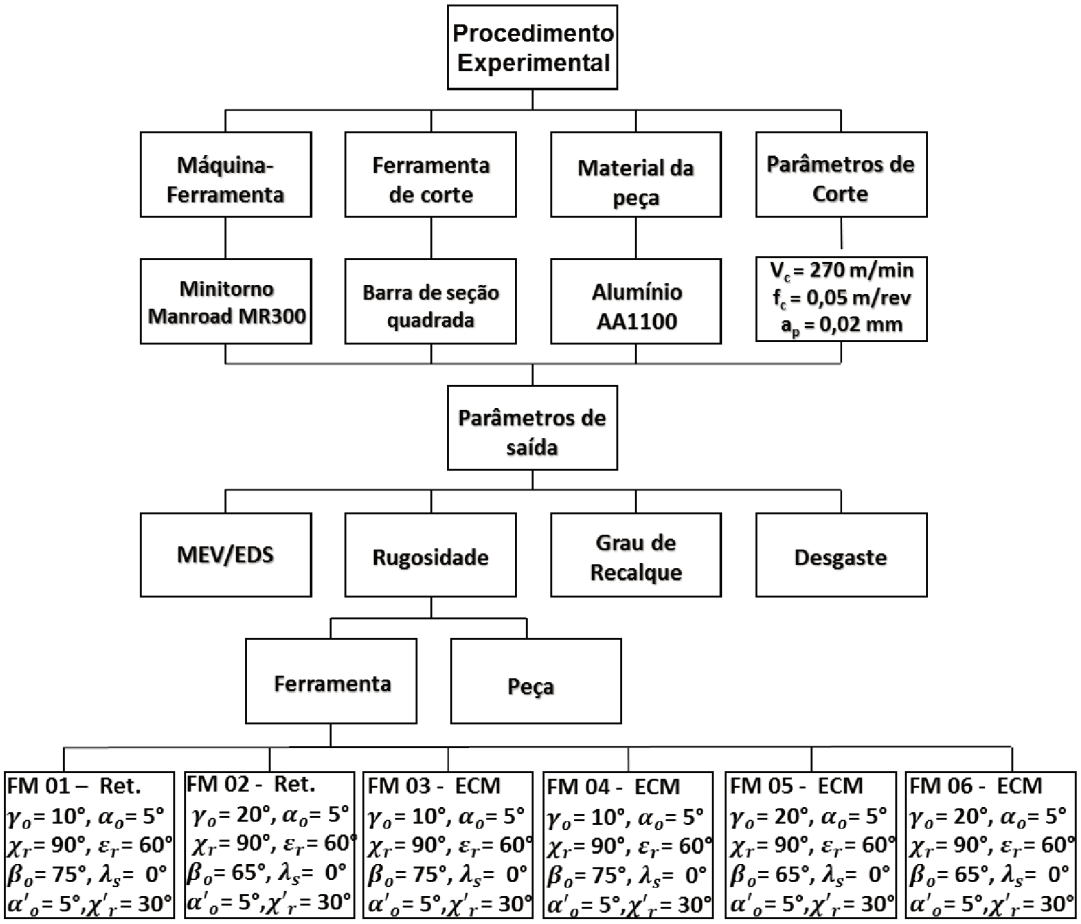
O diamante sintético não pode ser usado para usinar aço ou qualquer outro material ferroso, porque quando a temperatura ultrapassa 700℃, ele se desintegra quimicamente, por isso ele tem sido usado com mais frequência para a usinagem de ligas alumínio (MACHADO et al., 2015).

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os equipamentos necessários para fabricação dos corpos de prova de alumínio AA1100 e preparação das ferramentas de aço rápido para o microtorneamento. Também são fornecidas as informações sobre os procedimentos experimentais realizados, a metodologia empregada para os ensaios, a máquina-ferramenta, as condições de corte do microtorneamento, as condições para remoção de material da usinagem eletroquímica e os parâmetros de saída.

Para uma melhor compreensão de como o procedimento experimental ocorreu, um fluxograma das atividades realizadas, apresentado na Figura 3.1, foi feito.



Obs. Ret.- Retificada

Figura 3.1 - Fluxograma com as atividades realizadas do procedimento experimental.

3.1 Materiais e métodos

Nesta sessão são apresentados os detalhes dos equipamentos e materiais empregados para a realização dos ensaios de microtorneamento. Os corpos de provas (CP), foram identificados nesse trabalho por CP01, CP02, CP03, CP04, CP05 e CP06. Cada corpo de prova foi relacionado com uma ferramenta (FM), ou seja, CP01 usinado por FM01 e assim por diante.

3.1.1 Máquina-ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios foi o Minitorno Profissional MANROD-MR300 de bancada com curso transversal de 65 mm, distância entre pontas de 300 mm, controle de rotação de 0 rpm a 2 500 rpm, potência de 250 W e monofásico 220 V. A máquina-ferramenta foi aprimorada por Silva (2018) e recebeu, dentre outras características, um controle numérico computadorizado (CNC e o

programa de controle Mach3®). O equipamento encontra-se no laboratório de microusinagem do grupo do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

3.1.2 Ferramenta de corte

Nos ensaios de microtorneamento a ferramenta usada foi a barra de seção quadrada com dimensões de fábrica (101,60 mm × 9,53 mm) da marca TOOL MASTER. Esta barra de seção quadrada foi fabricada conforme a norma DIN 4964-1 (DIN, 1962), temperado e revenido com 65 HRC, fabricado em aço rápido ABNT M2, proporcionando maior resistência, trabalho em altas temperaturas, menor desgaste sem perder o poder de corte após a afiação e com uma boa aceitação para usinar alumínio (METALS HANDBOOK, 1989; GRUPOALBAFER, 2018).

A Tabela 3.1 apresenta informações sobre a composição química do material da ferramenta usada para esse trabalho.

Tabela 3.1- Composição química da barra de secção quadrada de aço rápido ABNT M2 (FAVORIT, 2018; VILLARESMETALS, 2018)

Composição química	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	W (%)	V (%)	P (%)	S (%)
Aço Rápido ANBT M2	0,82	0,30	0,30	4,10	5	6,2	1,9	2	6,1

A Cortadora Metalográfica TECLAGO CM 70 de potência 3 KW, presente no Laboratório de Apoio a Fabricação (LAF), foi utilizada para dividir ao meio três barras de secção quadrada. Na cortadora metalográfica foi fixado a barra de aço rápido na morsa e posicionou-se as mangueiras de fluidos para a região do corte. Após o correto posicionamento, foi fechado a tampa da cabine, ligou a máquina e com uma haste manual responsável pelo avanço do disco de corte, foi feito o corte. Logo após o corte, foi retirado as barras seccionadas da cortadora. O corte foi realizado com avanço manual lento e fluido de corte em abundância de modo a evitar qualquer alteração microestrutural causado pelo aumento da temperatura.

Foram obtidas seis barras de aço rápido para definir nelas a geometria das ferramentas de corte por meio de uma afiadora. Na Tabela 3.2 são apresentados os principais ângulos das ferramentas de corte.

Tabela 3.2 – Geometria das ferramentas de corte de aço rápido.

Ângulos de corte	FM01	FM02	FM03	FM04	FM05	FM06
γ_o	10°	20°	10°	10°	20°	20°
α_o	5°	5°	5°	5°	5°	5°
χ_r	90°	90°	90°	90°	90°	90°
ε_r	60°	60°	60°	60°	60°	60°
β_o	75°	65°	75°	75°	65°	65°
λ_s	0	0	0	0	0	0
α'_o	5°	5°	5°	5°	5°	5°
χ'_r	30°	30°	30°	30°	30°	30°

Obs. FM: ferramenta de corte

As afiações das barras de aço rápido foram realizadas no LEPU empregando-se a afiadora Universal Atlasmaq PP-6025Q com motor de 0,75 CV, rotação de 5 000 rpm no sentido horário ou anti-horário, com morsa de precisão para fixar a peça, resolução de 0,02 mm do eixo linear e avanço manual, com corte à seco, tendo como ferramenta abrasiva o rebolo de Al_2O_3, indicado para retificação de ferramentas de aço rápido. O rebolo de copo reto, de fabricação Carborundum de Al_2O_3, possui dimensões originais de 101,6 mm de diâmetro externo, 50,8 mm de espessura e 31,75 mm de diâmetro interno, de designação 6A AA46 K8V40W.

A fixação do rebolo na afiadora foi feita por um parafuso central e dois parafusos ao lado. O rebolo já apresentava sinais de uso, tendo dimensões diferentes de um rebolo com dimensões de fábrica.

A afiadora possui uma estrutura de movimentação do rebolo orientável por escalas goniométricas, que permite retificar as barras de seção quadrada de acordo com a geometria definida. Para aproveitar ao máximo a superfície do rebolo foi necessário nivelar a altura do centro do rebolo com o meio da barra de seção quadrada.

Segundo Mello e Silva, (2013) a afiação das ferramentas na afiadora Atlasmaq (a mesma afiadora deste trabalho), não atende aos critérios de repetibilidade e reprodutibilidade, conforme a ISO/TAG 4/WG 3 (2008 *apud* INMETRO, 2012a), porém como as ferramentas possuem apenas os ângulos de saída diferentes, ajustou-se a Afiadora para que fizesse a mesma superfície em todas ferramentas sem que variasse o ajuste angular da máquina, ou seja, em um mesmo ajuste da superfície de folga

secundária foram afiadas todas as ferramentas, trocando para a superfície de folga principal, afiando todas as ferramentas e, por último, usinou-se a superfície de saída.

Com o operador frente a máquina, movimentou-se a barra de aço rápido sobre a superfície do rebolo, através da mesa de avanço manual, com movimentos recíprocos (vaivém). O operador registrou que se o avanço for muito lento, terá um maior tempo de contato com o rebolo, o que favorece mais o atrito que o cisalhamento, podendo queimar a barra de seção quadrada durante a retificação.

O processo de afiação tem melhor desempenho de corte quando fluido de corte adequado é empregado para refrigerar e lubrificar, minimizando a temperatura no aço rápido e reduzindo o atrito na interface de corte (MELLO; SILVA, 2013). A máquina afiadora Atlasmaq não possui cabine de proteção, podendo expelir fluido para o exterior da máquina e atrapalhar os demais processos e uso de equipamentos do laboratório. Optou-se, então, por fazer a afiação à seco, com um maior cuidado para não provocar danos severos nas superfícies do aço rápido.

Seguindo recomendações de trabalhos anteriores com a mesma afiadora, foi selecionado a_p= 0,06 mm por ciclo de retificação de desbaste, até alcançar a geometria desejada, pois com profundidades maiores que essa, o efeito deletério do aquecimento danificaria a ferramenta de aço rápido (MELLO; SILVA, 2013). Logo após a aproximação das dimensões pretendidas das superfícies de trabalho da ferramenta, a mesma foi afiada em regime de acabamento com a_p= 0,02 mm por ciclo, com o objetivo de preservar a face retificada.

O operador registrou também que à medida em que as barras de seção quadradas eram retificadas, era reduzido o desempenho de corte do rebolo. Para reestabelecer o desempenho de corte, o rebolo foi dressado usando um dressador de ponta única de diamante sintético, do fabricante WINTER, com ε_r= 0,3 mm, cujas dimensões da ponta já apresentavam condições de desgaste.

Para conferir os ângulos de afiação das barras foi usado um transferidor de visor angular da marca Kingtools.

3.1.3 Usinagem Eletroquímica

Para a usinagem eletroquímica foi usado a Fonte de Alimentação de corrente contínua programável da marca BK PRECISION e modelo XLN10014, fornecendo até 1,44 kW em uma única saída. As ferramentas que foram usinadas eletroquimicamente foram as ferramentas 03, 04, 05 e 06. Para usinagem montou-se uma bancada de ensaios, exibida na Fig. 3.2, tendo como eletrólito uma solução de NaCl dissolvido em

água destilada formando a cuba eletrolítica (recipiente de acrílico, não condutor de corrente elétrica).

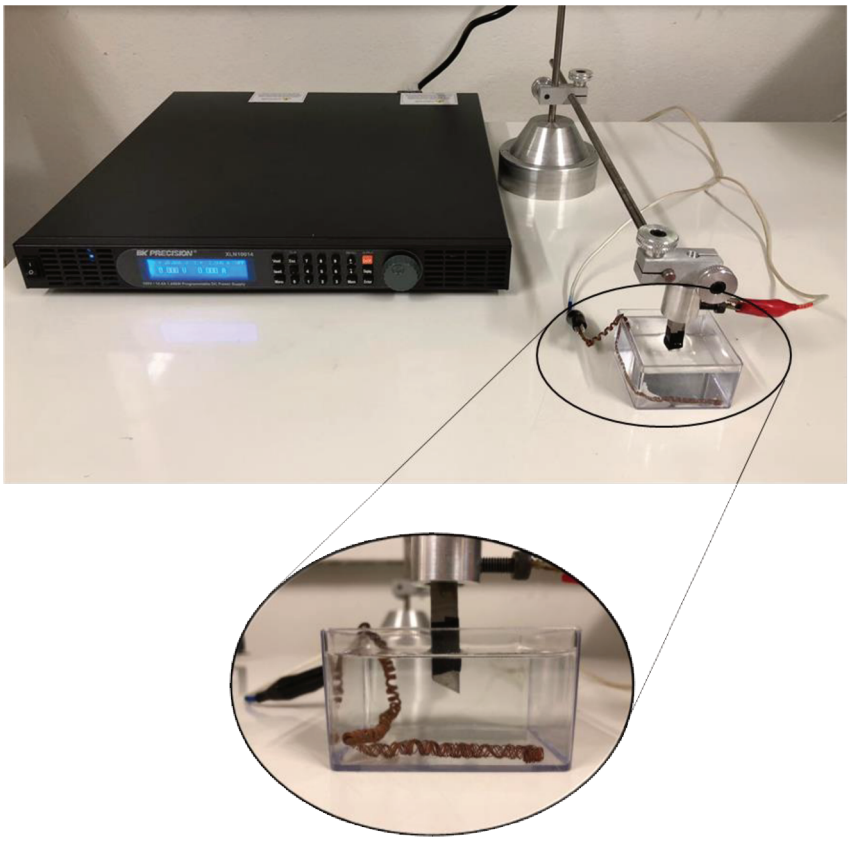


Figura 3.2 - Bancada de ensaios para a usinagem eletroquímica.

Na Figura 3.2 observa-se a bancada de ensaios da usinagem eletroquímica que é composta da fonte de alimentação de corrente contínua, o suporte de alumínio que encaixa a ferramenta e permite passagem de corrente elétrica, os cabos condutores de corrente elétrica, a cuba eletrolítica de acrílico, o eletrodo de cobre em forma de espiral com sua maior parte submersa no eletrólito e a ferramenta protegida pela máscara polimérica, uma parte mergulhada na água e a outra parte acoplada no suporte.

Na Figura 3.3 é apresentado um esquema representativo da usinagem eletroquímica realizada nas pontas das ferramentas.

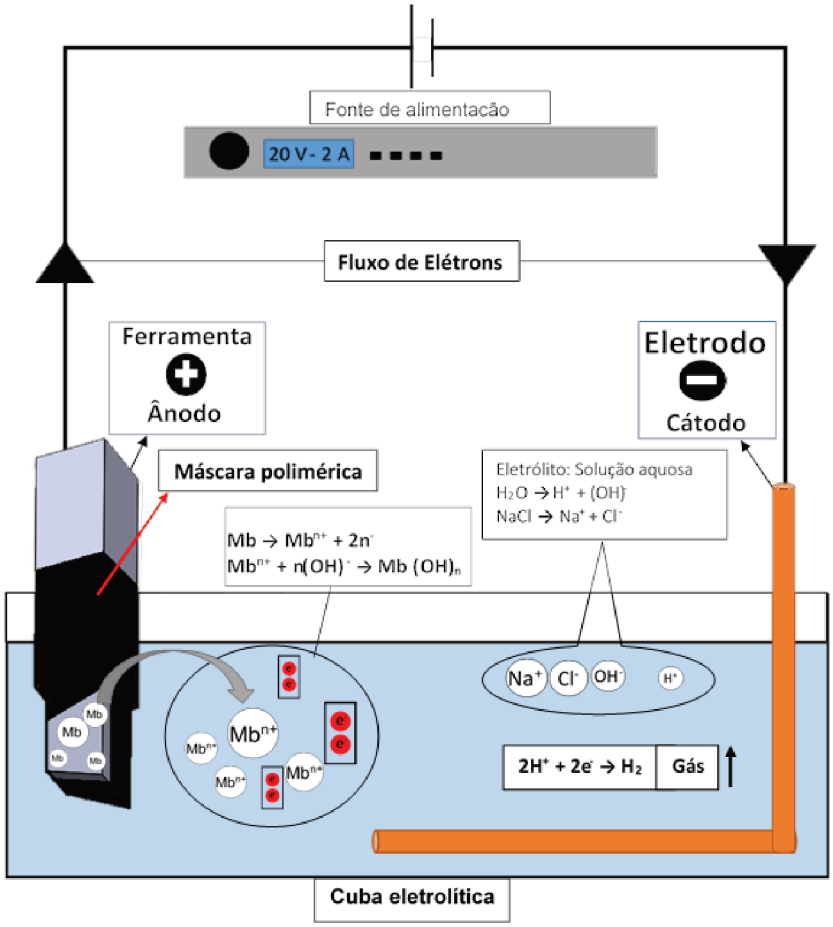


Figura 3.3 - Representação Esquemática do Processo de Usinagem Eletroquímica da ferramenta de aço rápido em solução de água e NaCl.

A ferramenta a ser usinada e o eletrodo constituem o ânodo e o cátodo, respectivamente, e ambos são submersos no eletrólito. Para entender o que se passa dentro dessa célula eletrolítica, sabe-se que nos metais, a condução de corrente é assegurada pelos elétrons, enquanto nos eletrólitos, ela é obtida por transferência de carga dos íons. A solução de NaCl com H_2O dissocia-se em íons livres de H^+, $(OH)^-$, Na^+ e Cl^-. A fonte alimentadora produz uma corrente elétrica que passa pelo eletrólito e, portanto, é acompanhada da transferência de matéria. Sob ação de uma diferença de potencial, o campo elétrico criado entre a peça e o eletrodo provoca movimento dos ânions (-) para o ânodo e migração dos cátions (+) para o cátodo.

Quando foi aplicado a diferença potencial e a corrente elétrica, houve corrosão química na parte exposta da ferramenta ($Mb \rightarrow Mb^{n+} + ne^-$). Posteriormente, houve a formação de precipitados $Mb^{n+} + (OH)^- \rightarrow Mb(OH)$, que desceram para o fundo da cuba eletrolítica. Outra reação química que ocorreu foi $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ em que o gás hidrogênio é eliminado para a atmosfera.

Foi usado uma máscara polimérica para deixar apenas as pontas das ferramentas expostas. Todas as ferramentas que passaram por usinagem eletroquímica foram usinadas sob uma tensão de 20 V, uma corrente elétrica de 2 A e para cada ensaio era substituído a solução eletrolítica usada por uma nova. Os parâmetros de entrada que variaram de uma ferramenta para outra foi a concentração de NaCl e o tempo de usinagem. A FM03 e a FM05 foram usinadas nos eletrólitos aquosos de concentração 20 g/l por 25 s, enquanto a FM04 e FM06 foram usinadas nos eletrólitos aquosos de concentração 40 g/l por 15 s.

Após o término da usinagem foi realizada a neutralização com água destilada e a limpeza com acetona. Por fim, foram capturadas as imagens no MEV, finalizando a preparação dessas ferramentas, deixando-as prontas para os ensaios de microtorneamento.

.

3.1.4 Corpo de prova

O material do corpo de prova foi a liga de Alumínio Comercialmente Puro (AA 1100) de composição química apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição química da liga de alumínio AA 1100 (adaptado de IMPERIO DOS METAIS, 2018).

Composição Química	Al (%)	Fe (%)	Si (%)	Cu (%)	Mn (%)	Zn (%)	Ti (%)
Corpo de prova	99,17	0,40	0,25	0,05	0,05	0,05	0,03

O corpo de prova de alumínio AA100 foi cortado com a serra-fita marca Starrett, modelo S1101 a partir de uma barra cilíndrica com diâmetro 38 mm. Dessas barras obteve 6 peças cilíndricas com o comprimento de aproximadamente 210 mm.
Como a serra-fita não possui uma precisão de corte para deixar as faces acabadas, paralelas e com o diâmetro ideal, utilizou-se o torno Imor, modelo prn-320 com uma ferramenta de metal duro, modelo 1604PDFR-MA, marca Sandvik, específica para alumínio, para concluir a preparação dos corpos de prova, finalizando-os conforme a geometria da Figura 3.4. O rebaixo foi necessário para fixação do corpo de prova nas castanhas do minitorno e o comprimento usinado estipulado foi de 180 mm, definido em ensaios preliminares visando alcançar desgaste considerável da ferramenta após cada passe.



Figura 3.4 - Geometria do corpo de prova de alumínio AA1100 para ensaios no minitorno MR300.

O corpo de prova foi centrado na placa do minitorno. Logo em seguida, usou a ferramenta de metal duro, marca Sandvik, modelo DCX070204-AL com um suporte marca Sandvik, modelo SDACR 1212K 07-S, Core Turn 107 a fim de desbastar a superfície do corpo de prova e minimizar a tolerância de batimento, definindo um diâmetro final de 35,50 mm.

3.2 Parâmetros de Entrada e Saída

Nesta seção serão apresentadas as variáveis de saída adotadas para avaliar o corpo de prova de alumínio AA1100 e o desgaste da ferramenta de aço rápido, sendo elas: rugosidade, imagens da superfície retificada via MEV, composição química pelo EDS, rebarba e grau de recalque do cavaco.

Antes dos ensaios definitivos, foram realizados vários ensaios preliminares com o objetivo de estabelecer os parâmetros de entrada desse trabalho. Na usinagem eletroquímica foi escolhido duas condições de usinagem baseadas nesses ensaios preliminares, usando como critério uma avaliação qualitativa de imagens do MEV. A primeira condição de usinagem eletroquímica utilizou eletrólito com concentração de 20 g/l de NaCl em solução aquosa de água destilada em um tempo contínuo de usinagem de 25 s (tempo de ataque), já a segunda condição foi uma concentração de 40 g/l de NaCl e Δt = 15 s. A tensão e corrente elétricas foram mantidas constantes, U = 20 V e I = 2 A. Na Tabela 3.4 são apresentados os parâmetros de entrada e os parâmetros de saída analisados nesta pesquisa.

Tabela 3.4 – Parâmetros de entrada e de saída dos ensaios definitivos.

<table>
<tr><th colspan="4">Parâmetros de Entrada</th><th colspan="2">Parâmetros de saída</th></tr>
<tr><td colspan="2">Microtorneamento</td><td colspan="2">Usinagem Eletroquímica</td><td rowspan="2">Rugosidade</td><td>Corpo de prova</td></tr>
<tr><td>V_c</td><td>270 m/min</td><td>Δt (s)</td><td>15 e 25</td><td>Ferramenta</td></tr>
<tr><td>a_p</td><td>0,2 mm</td><td>Tensão (V)</td><td>20</td><td colspan="2">Desgaste da Ferramenta</td></tr>
<tr><td rowspan="2">f_C</td><td rowspan="2">0,05 mm/rev</td><td rowspan="2">Corrente (A)</td><td rowspan="2">2</td><td colspan="2">Grau de recalque</td></tr>
<tr><td colspan="2">MEV-EDS</td></tr>
</table>

Os parâmetros de microtorneamento também foram definidos em ensaios preliminares. A norma ISO 3685 (1993) estabelece critério de desgaste de flanco médio (VB_{Bmax}) de 0,6 mm para a macrousinagem. Porém, para esse trabalho, foi estabelecido o critério de VB_{Bmax} = 0,2 mm por se tratar de um processo de remoção em microescala. Os critérios de fim de vida na microusinagem são objetos de discusssões atuais e não existem consenso nem norma específica disponível. Os ensaios preliminares revelaram que o critério de fim de vida da ferramenta de corte foi alcançado em média ao final de 5 passes. Dessa forma, a avaliação da ferramenta ao final de cada passe permitiu acompanhar a progressão do desgaste e determinar o mecanismo e as avarias sofridas pela ferramenta.

Imagens das ferramentas ao final de cada passe foram obtidas por MEV e em seguida tratadas no programa computacional Image J para quantificar o desgaste a adesão nas superfícies.

Foi usada a rotação máxima do eixo-árvore do minitorno (2 445 rpm) para todos os passes de usinagem. A Tabela 3.6 apresenta a velocidade de corte real dos 5 passes. Foi empregado um corpo de prova para cada condição, de modo que os passes consecutivos promoveram a redução gradual do diâmetro dos corpos de prova e, consequentemente, da velocidade de corte. O minitorno utilizado nos ensaios não possui controle de rotação com resolução adequada para manter constante a rotação com a redução do diâmetro da peça. Essa decisão foi assumida para reduzir a quantidade de corpos de prova, sendo a velocidade média 270 m/min.

Tabela 3.6 - Velocidade de corte em cada passe de usinagem.

Passe	Velocidade de Corte (m/min)
1	275,48
2	272,38
3	269,27
4	266,17
5	263,06

3.2.1 Rugosidade

A rugosidade da superfície usinada do corpo de prova foi definida pelos parâmetros R_a utilizando o Rugosímetro portátil Surtronic 3+, modelo 112/1590, fabricado pela Taylor Hobson, com agulha do apalpador de diamante e ε_r = 2 µm. Foi usado um *cut-off* de 0,8 mm e um comprimento de medição de 4 mm de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008).

A rugosidade inicial do corpo de prova foi medida após a fixação do corpo de prova na placa de três castanhas e contra-ponta e a realização de um passe com a ferramenta de metal duro para ajuste da tolerância de batimento. A medição foi realizada perpendicularmente às marcas de avanço sempre com a peça presa à máquina-ferramenta. O Rugosímetro foi apoiado sobre um suporte móvel que envolveu o torno.

Foram medidas as rugosidades das ferramentas nas superfícies de saída antes de iniciar o processo do microtorneamento. As ferramentas FM01 e FM02 foram medidas após a afiação na afiadora universal e as ferramentas FM03, FM04, FM05 e FM06 após a usinagem eletroquímica. Para mensurar as rugosidades nessas ferramentas foi usado o Perfilômetro, modelo Form Talysurf Intra 2 da marca Taylor Hobson, com resolução de 0,016 µm, faixa nominal vertical de 1 mm, usado para medir também forma e superfície com alta precisão, sobre um suporte elevado de granito com absorção de vibrações por molas, localizado na sala da microusinagem do LEPU. Os parâmetros de rugosidades usados nas ferramentas foram: R_a, R_q, R_t, R_z, R_{Sm}, R_{sk}, R_{ku} e R_{dq}.

3.2.2 Imagens das ferramentas

A limpeza das ferramentas foi realizada por ultrassom empregando-se uma Cuba Ultrassônica, marca Yaksun e modelo DNS 3060, utilizando acetona pura.

Após a limpeza, as ferramentas foram levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura de mesa (MEV), modelo TM3000 da marca HITACHI localizado no LEPU. As ferramentas foram caracterizadas novas e após cada passe do microtorneamento.

3.2.3 Grau de Recalque

Para cada amostra de cavacos coletados no teste de torneamento foi escolhido um cavaco aleatoriamente e medido sua espessura (h') utilizando um Micrômetro Externo Digital da marca Mitotoyo com faixa nominal 0-25 mm, com resolução 0,001 mm, tal processo foi repetido 5 vezes. Com estes valores obteve o grau de recalque dado pela Eq. 2.1. Onde o valor de h foi a espessura real de corte a partir das medições do diâmetro antes e após cada passe.

CAPÍTULO IV

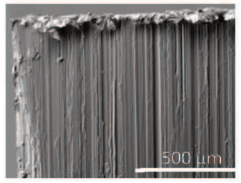
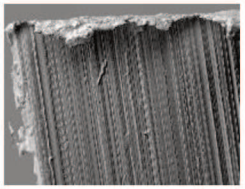
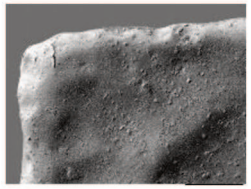
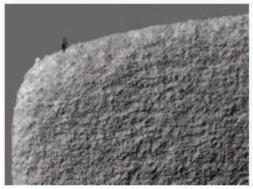
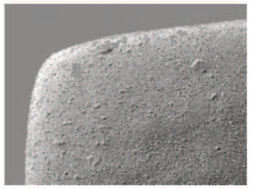
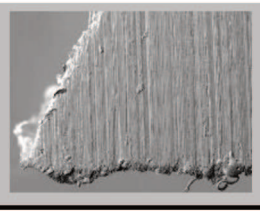
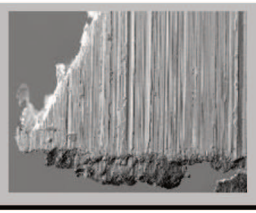
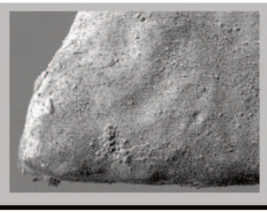
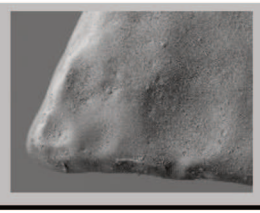
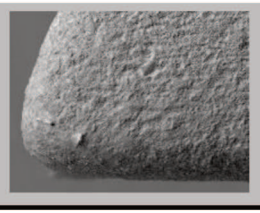
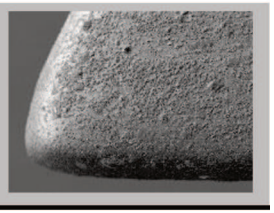
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desta pesquisa serão apresentados na seguinte sequência: (4.1) rugosidade das ferramentas, (4.2) desgaste da ferramenta, (4.4) MEV-EDS das ferramentas, (4.4) rugosidade dos corpos de prova e (4.5) grau de recalque.

4.1 Rugosidade das ferramentas

Na Tabela 4.1 são apresentadas as imagens da superfície de saída e de folga das ferramentas e os valores de rugosidade (R_a, R_q, R_t, R_z, R_{Sm}, R_{sk}, R_{ku} e R_{dq}) antes do início do microtorneamento nos corpos de provas de alumínio.

Tabela 4.1 – Resultados de rugosidade após a preparação das ferramentas para a microusinagem.

Superfície de folga						
Superfície de saída						

Ferramentas / Parâmetros	FM01	FM02	FM03	FM04	FM05	FM06
R_a (µm)	0,311	0,226	1,383	0,845	1,255	0,761
R_q (µm)	0,409	0,296	1,696	1,157	1,601	0,947
R_t (µm)	2,780	1,873	8,774	8,102	9,243	5,808
R_z (µm)	2,037	1,500	6,695	5,134	7,273	4,422
R_{Sm} (µm)	94,220	94,220	94,220	94,220	94,220	94,213
R_{sk}	-0,067	-0,438	-0,033	-0,359	0,306	0,133
R_{ku}	4,147	3,607	2,679	5,318	2,741	2,915
R_{dq} (°)	7,463	5,670	9,710	9,493	17,547	13,697

Obs. FM: Ferramenta

As imagens da ferramenta obtidas pelo MEV fornecem subsídios para identificar os efeitos da usinagem eletroquímica ou da retificação abrasiva nas ferramentas. As ferramentas FM01 e FM02 apresentam marcas de avanço do rebolo nas superfícies de saída e de folga. Essas marcas afetam o perfil de rugosidade e a aparência da superfície retificada. Observa-se também a presença de rebarbas na aresta de corte dessas ferramentas, por onde o rebolo entrou na ferramenta. Segundo Vendrame (2015) essas rebarbas continuaram aderidas devido às baixas penetrações de corte empregadas na retificação.

Os pares de ferramentas FM01 e FM02, FM03 e FM05, FM04 e FM06 possuem valores de rugosidades aproximados, pois foram preparadas com as mesmas condições de preparação. A ferramenta FM02 apresentou melhores resultados de rugosidade que a FM01, devido provavelmente aos menores danos térmicos durante a retificação.

Entre as ferramentas que foram usinadas eletroquimicamente, observa-se a ausência das rebarbas e das marcas de avanço do rebolo, uma vez que a dissolução do aço rápido durante a usinagem eletroquímica causou desprendimento dessas rebarbas e nova texturização das superfícies de saída e de folga da ferramenta. Neto, Buzzato e Rebello (2011) alcançaram resultados similares de rebarbação durante a usinagem eletroquímica. A remoção de material não uniforme das ferramentas 3, 4, 5 e 6, danificando a rugosidade das superfícies deve-se a uma possível corrosão seletiva na ferramenta durante a usinagem eletroquímica.

Na Figura 4.1 é apresentada a ferramenta FM03 após a usinagem eletroquímica. Pode-se observar a região onde houve a usinagem eletroquímica da ferramenta e a região que foi preservada com máscara polimérica. A máscara polimérica foi, portanto, importante para a usinagem, garantindo a ação da usinagem eletroquímica apenas na região pretendida da ferramenta.

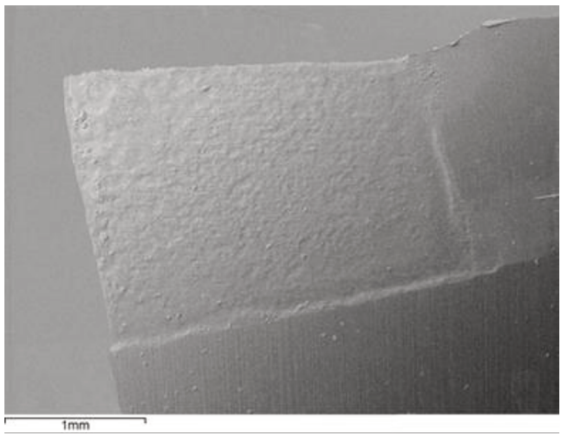


Figura 4.1 - Efeito da mudança de textura e corrosão da ferramenta quando submetida a usinagem eletroquímica, FM03 (U = 20 V, I = 2 A, C = 20 g/l e Δt = 25 s).

As condições de usinagem eletroquímica utilizadas foram consideradas severas, pois pioraram significativamente a rugosidade superficial das ferramentas em comparação com as que foram apenas retificadas. Segundo Sandvik (2018), um acabamento superficial insatisfatório dificulta o escoamento do cavaco, consequentemente, aumenta a rugosidade das peças torneadas.

A usinagem eletroquímica das ferramentas 3 e 4 obtiveram menor arredondamento da ponta de corte que as ferramentas FM05 e FM06, por serem mais robustas.

Verificou-se que, entre as ferramentas de usinagem eletroquímica, a concentração do eletrólito e o tempo de usinagem eletroquímica influenciaram diretamente no acabamento superficial das superfícies de saída e superfície de folga da ferramenta. Esse comportamento é evidenciado pelos resultados da Tab. 4.1 onde o eletrólito de concentração de 20 g/l de NaCl usinando durante 25 s proporcionou pior acabamento superficial que a concentração de eletrólito de 40 g/l usinando por 15 s.

É importante ressaltar que o parâmetro tempo de ataque foi mais influente que a concentração de eletrólito na determinação do acabamento superficial. Isso ocorre porque, segundo Da Silva (2001), o Cl^-, por suas propriedades complexantes, impede a passivação completa do eletrodo, ocasionando a corrosão seletiva da ferramenta e quanto maior o tempo de usinagem, maior a remoção irregular de material.

4.2 Desgaste das ferramentas

Nas Figuras 4.2.1 e 4.2.2 são apresentadas as imagens obtidas por meio de MEV das superfícies de saída e do flanco das ferramentas antes do ensaio definitivo e após cada passe do microtorneamento, respectivamente. As imagens têm objetivo de monitorar a evolução do desgaste de flanco e a ocorrência de adesão do material do corpo de prova na ferramenta em condições específicas.

Nas ferramentas 1 e 2, o desgaste de flanco foi visível pelas suas características apresentadas, mesmo com possíveis adesões do alumínio na superfície de folga ou na superfície de saída da ferramenta. Nas demais ferramentas (FM03, FM04, FM05 e FM06) foi observado o mecanismo de adesão da liga de alumínio AA1100 na ferramenta, fazendo uma camada de proteção na aresta de corte, ponta de corte, superfície de saída e superfície de folga, impedindo a visualização do desgaste de flanco. As condições de corte para esses ensaios de microtorneamento foram V_c= 270 m/min, f_c= 0,05 mm/rev, a_p= 0,2 mm.

Figura 4.2.1 – Imagens obtidas pelo MEV da superfície de folga das ferramentas de corte

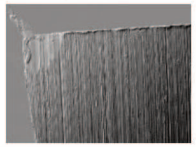
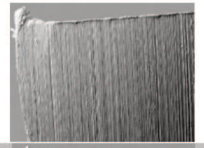
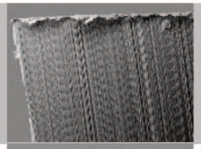
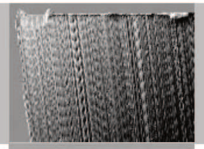
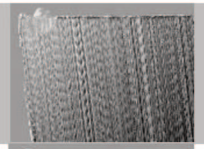
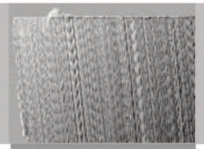
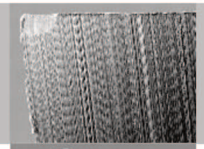
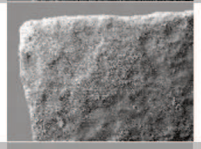
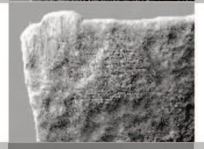
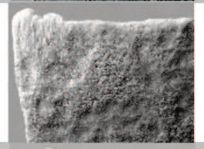
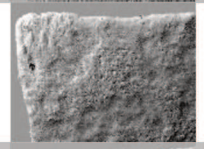
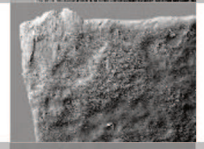
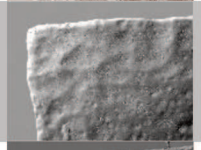
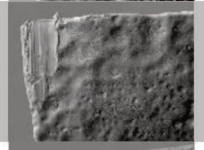
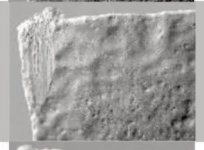
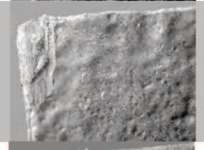
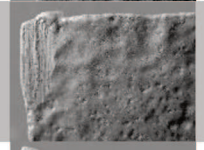
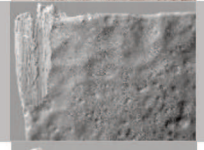
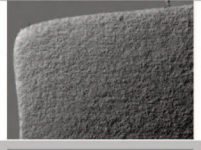
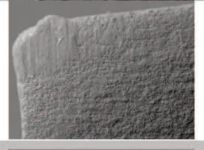
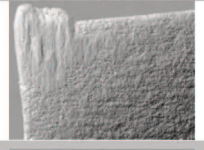
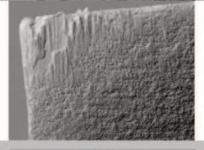
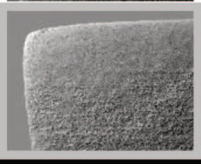
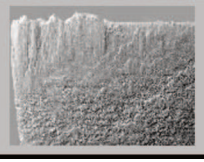
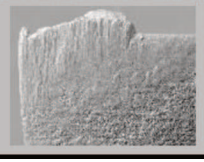
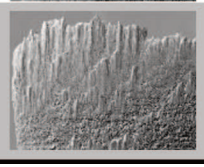
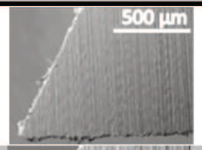
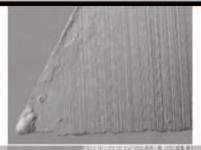
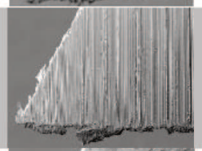
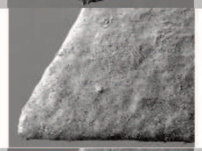
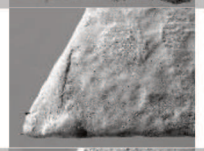
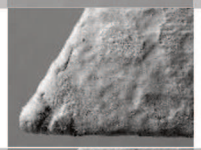
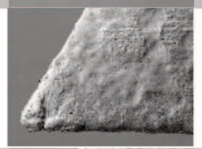
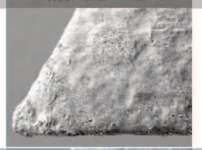
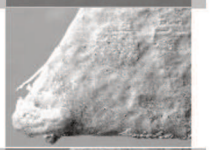
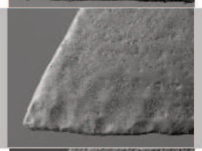
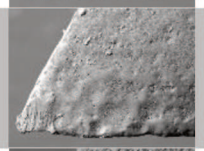
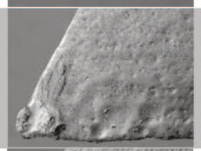
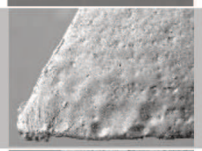
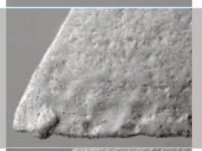
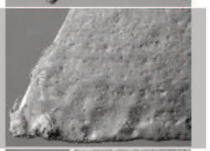
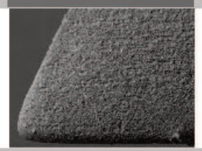
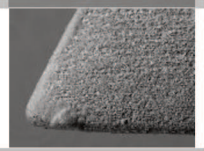
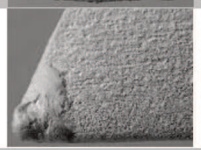
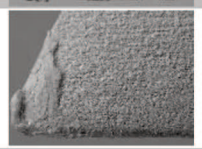
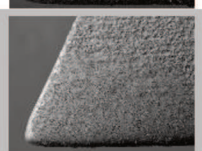
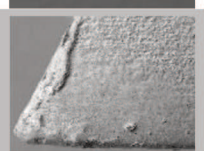
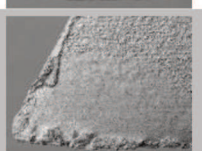
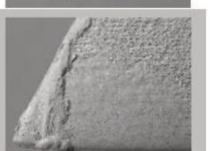
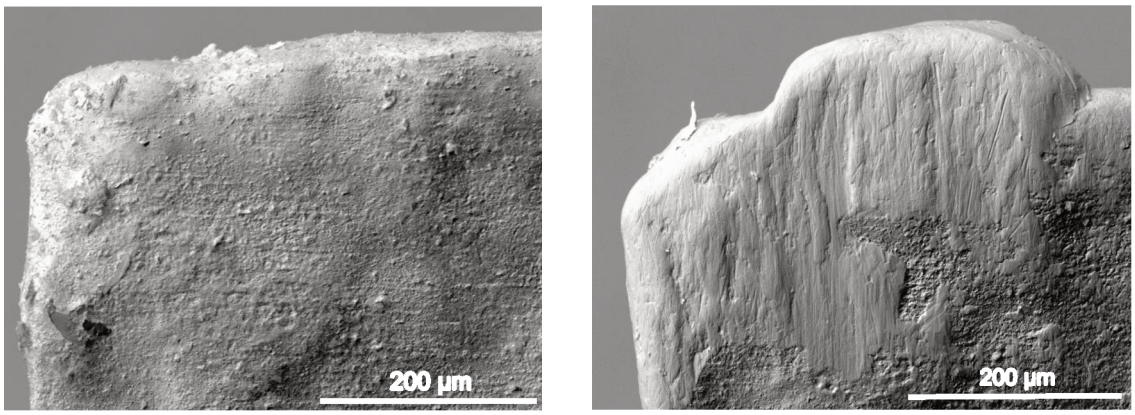
	Superfície de folga					
Ferramentas	Nova	passe 1	passe 2	passe 3	passe 4	passe 5
01						
02						
03						
04						
05						
06						

Figura 4.2.2 – Imagens obtidas pelo MEV da superfície de saída das ferramentas de corte

	Superfície de saída					
Ferramentas	Nova	passe 1	passe 2	passe 3	passe 4	passe 5
01						
02						
03						
04						
05						
06						

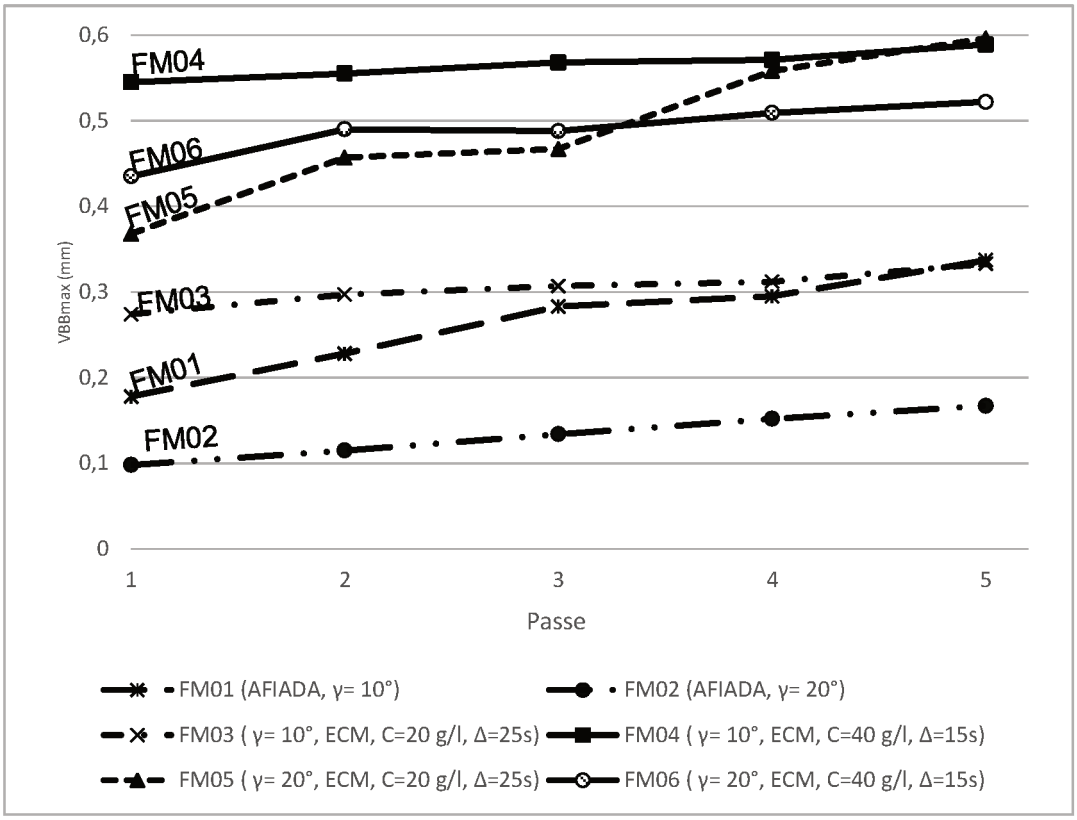
Na Figura 4.3 são apresentadas imagens da superfície de folga da ferramenta 3 antes do microtorneamento (a) e após o primeiro passe de microtorneamento (b). Nota-se a grande quantidade de material aderido na ferramenta impossibilitando identificar o desgaste de flanco.



(a) (b)

Figura 4.3 - Superfície de flanco da ferramenta 3: (a) antes do microtorneamento e (b) após o primeiro passe do microtorneamento apresentando material aderido. Condições de usinagem (V_C = 270 m/min, f = 0,05 mm/rev, a_p = 0,2 mm), ferramenta 3 (γ = 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U = 20 V, I = 2 A, C = 20 g/l, Δt = 25 s).

Na Figura 4.4 são apresentados os valores do desgaste obtidos pelas medições nas imagens de MEV.



Obs. FM: Ferramenta.

Figura 4.4 - VB_{Bmax} (mm) em função dos passes do microtorneamento. Condições de usinagem (V_C = 270 m/min, f_c = 0,05 mm/rev, a_p = 0,2 mm), FM01 (retificada, γ = 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°), CP02 usinado por FM02 (retificada, γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°), FM03 (γ = 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U = 20 V, I = 2 A, C = 20 g/l, Δt = 25 s), FM04 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s), FM05 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (γ= 10°, U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s) e FM06 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U=20 V, I= 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s).

A adesão de alumínio nas ferramentas foi mensurada da mesma forma que o desgaste de flanco (VB_{Bmax}) por dois motivos:

- a adesão pode camuflar o desgaste de flanco de uma ferramenta, fazendo-se necessário realizar um ataque químico para retirada do material aderido (ROSA, 2017). Devido a indisponibilidade de reagentes químicos para o ataque

seletivo, optou-se pela medição da dimensão da adesão sob a ferramenta de corte.

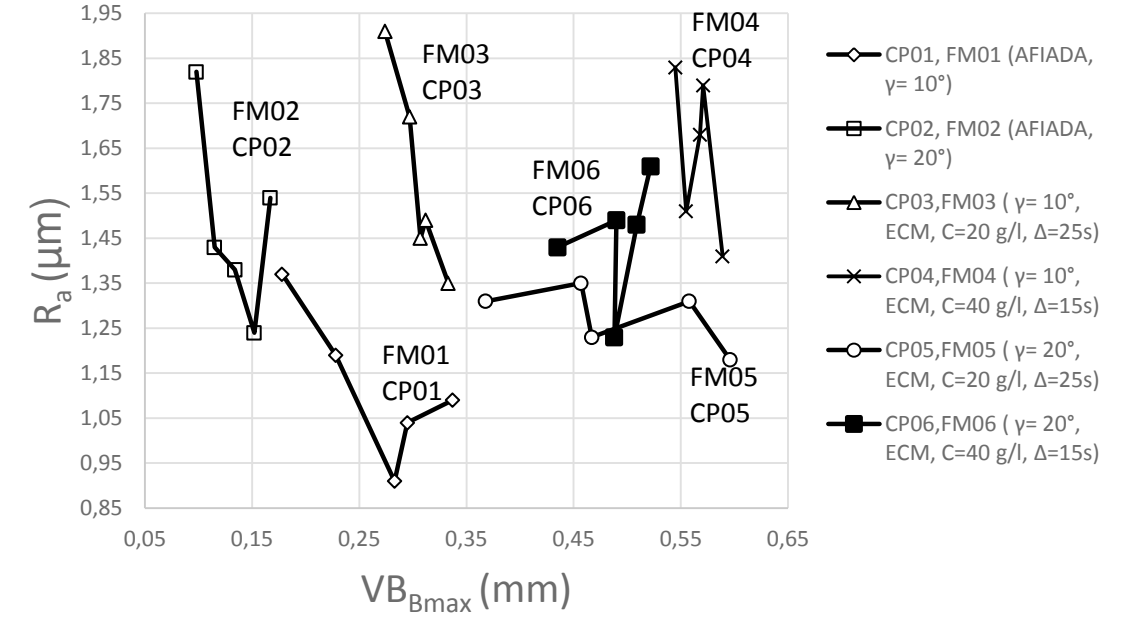
- Machado *et al.* (2015) comentam também que a adesão causa proteção da região de corte com o material aderido podendo formar uma nova aresta denominada APC e modificar a geometria da ferramenta durante a usinagem, com isso interferirá na rugosidade superficial do corpo de prova e na vida da ferramenta.

Foi notado a presença de adesão do alumínio nas superfícies de folga e de saída da ferramenta. Segundo Machado *et al.,* (2015) a aderência depende do tempo de usinagem, das condições atmosféricas, da combinação do material da peça e da ferramenta e da velocidade de corte. Além de altas velocidades de corte e a elevada ductilidade do material da peça. Pelos valores de VB_{Bmax} ou adesão alcançados e, principalmente pela quantidade de ensaios realizados, não se pôde estabelecer uma correlação entre a rugosidade dos corpos de prova e os resultados de desgaste das ferramentas devido ao emaranhamento dos cavacos em forma de fita no corpo de prova, comprometendo a análise. O processo ideal seria a replicação dos experimentos utilizando ferramentas com quebra-cavaco.

Conforme apresentado na Fig. 4.3 as ferramentas retificadas, 1 e 2, apresentaram menores resultados de desgaste ou adesão que as ferramentas submetidas a usinagem eletroquímica. Uma possível explicação para esse fenômeno é a diferença de texturas das superfícies preparadas na usinagem eletroquímica. Sua maior rugosidade impede o fluxo do cavaco favorecendo a adesão de cavaco sob a ferramenta de corte.

4.2.1 Rugosidade dos corpos de prova em função do desgaste

Na Figura 4.5 são apresentados os resultados de VB_{Bmax} em função da rugosidade obtida após cada passe.



Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de Prova.

Figura 4.5 - Rugosidade (R_a) em função do VB_{Bmax}. Condições de usinagem (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev), CP01 usinado por FM01 (retificada, γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°), CP02 usinado por FM02 (retificada, γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°), CP03 usinado por FM03 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s), CP04 usinado por FM04 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I = 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s), CP05 usinado por FM05 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s) e CP06 usinado por FM06 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s).

Era esperado o aumento da rugosidade à medida em que o desgaste do flanco progredisse. Contudo, na Figura 4.5, observa-se que não houve relação proporcional entre os resultados. Uma possível explicação é a interferência do contato dos cavacos

com a superfície do corpo de prova durante a usinagem, causando efeitos negativos na rugosidade superficial. Outra explicação plausível é a adesão do alumínio alterando a geometria da ferramenta e o comportamento desta durante o corte.

4.3 MEV-EDS da ferramenta

Os resultados das análises das composições químicas (EDS) no MEV são apresentados no Apêndice A e a discussão é apresentada nesta seção. Foram obtidas imagens das superfícies de folga e de saída das ferramentas após o último passe com o objetivo de identificar a composição química do material aderido.

As análises de MEV-EDS comprovaram que todas as ferramentas apresentaram material do corpo de prova aderido nas superfícies de folga e de saída. Nas ferramentas 1 e 2 a adesão do material foi menor que nas demais ferramentas. A explicação para isso é a textura mais rugosa das ferramentas 3,4,5 e 6, que propiciam maior adesão do material usinado nas superfícies.

As imagens obtidas pelo MEV revelaram a formação de adesão, com dimensões e formas distintas, em quase todos os passes (ver Figura 4.2). Para ilustrar esse fenômeno, na Figura 4.6 é apresentada a ferramenta 4 após o segundo passe.

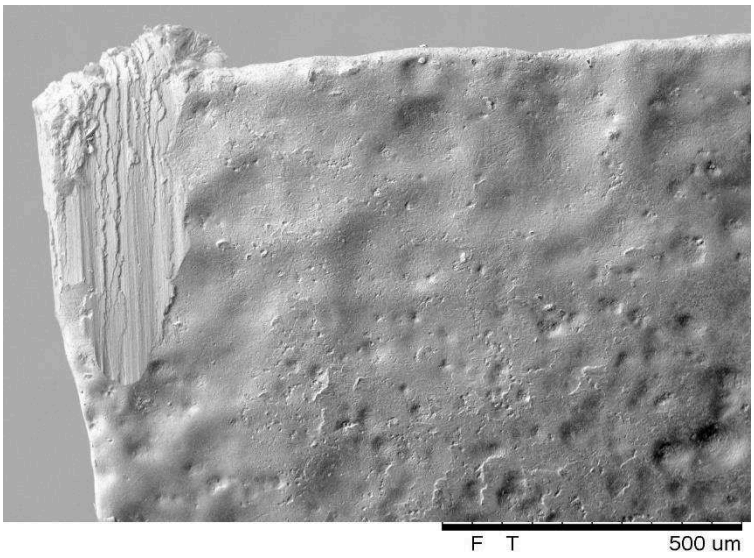


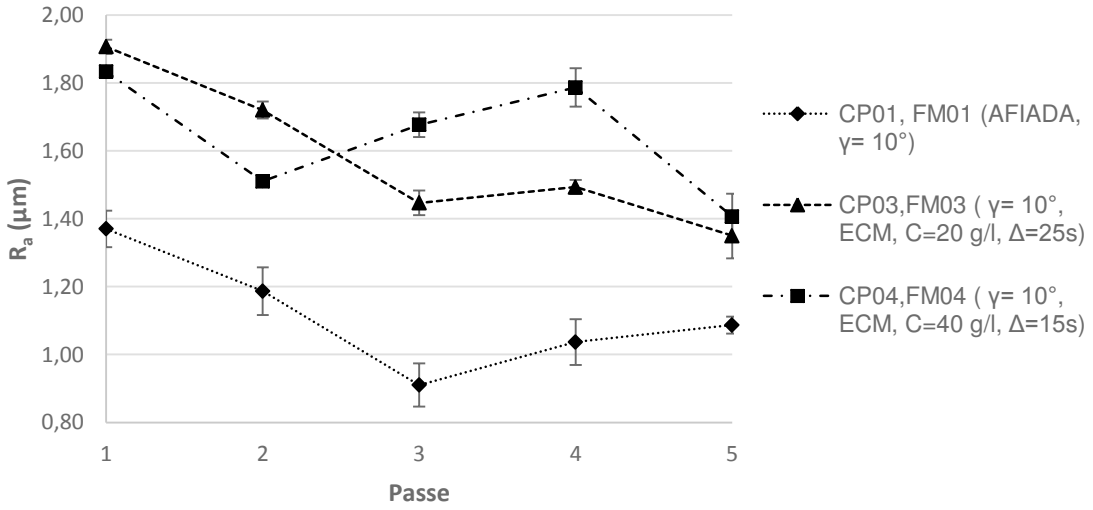
Figura 4.6 - Superfície principal de folga da ferramenta 4 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5 , χ'_r= 30, U= 20 V, I= 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s) após o segundo passe (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev) de microtorneamento revelando a presença de APC sobre a superfície de saída e adesão de material na superfície principal de folga.

O alumínio comercialmente puro utilizado nesse trabalho não possui certificado de composição química. Os resultados das análises de composição química no MEV-EDS do material aderido revelaram que a composição difere do padrão do material, principalmente pela presença de outros elementos químicos na sua composição.

Machado *et al.* (2015) afirmam que durante a usinagem a temperatura na região de corte aumenta a altas velocidades, eliminando o encruamento do material e evitando a formação e o crescimento da APC. Nesse trabalho foi usado uma velocidade de corte de 270 m/min, alta para os padrões de usinagem, não podendo identificar essa adesão como APC. A adesão deteriora a rugosidade da peça, sendo uma das possíveis causas das dispersões dos resultados de rugosidade apresentados na Fig. 4.5.

4.4 Rugosidade dos corpos de prova

Na Figura 4.7 e Figura 4.8 são apresentados os comportamentos da rugosidade R_a dos corpos de prova em função dos passes de microtorneamento em resposta às ferramentas com mesma geometria, mas submetidas a processos diferentes de preparação da aresta de corte.

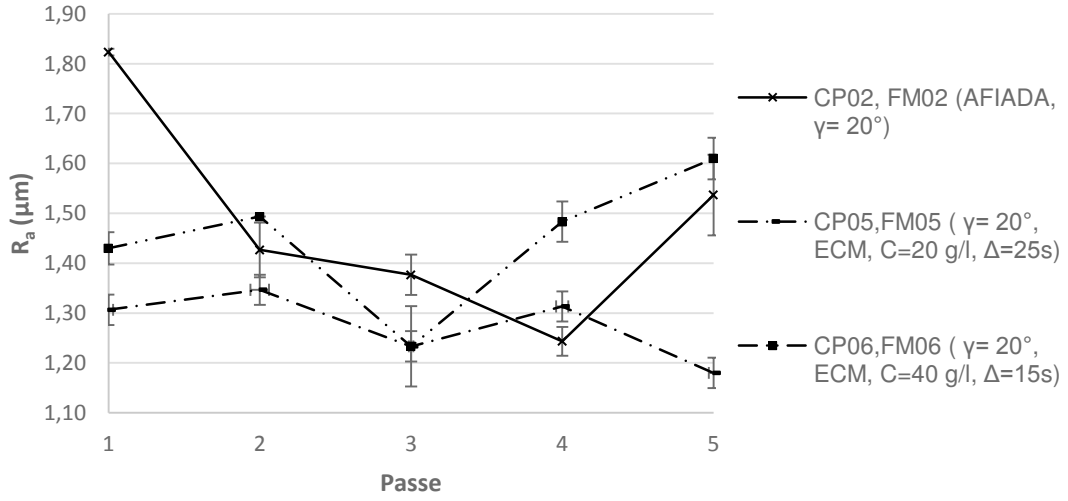


Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de prova.

Figura 4.7 - Rugosidade R_a dos corpos de prova CP01, CP03 e CP04 em função dos passes de microtorneamento com ferramentas de aço rápido. Condições de usinagem (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev), CP01 usinado por FM01 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30° retificada), CP03 usinado por FM03 (γ = 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5°,χ'_r= 30°)

com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s) e CP04 usinado por FM04 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s).

Notou-se que o CP01 apresentou valores de R_a menores que o CP03 e o CP04. Esse melhor acabamento superficial do CP01 pode ser explicado pela FM01 ter melhor acabamento superficial nas superfícies de saída e de folga que as FM03 e FM05 e por apresentar menores valores de desgaste de flanco da ferramenta. Outra possível explicação é a aresta de corte da FM01 ser mais afiada (menor arredondamento da ponta de corte) que as demais. Witting (2002), que comenta que uma ferramenta afiada facilita o cisalhamento, reduzem a força de corte e a carga térmica sobre a ferramenta.



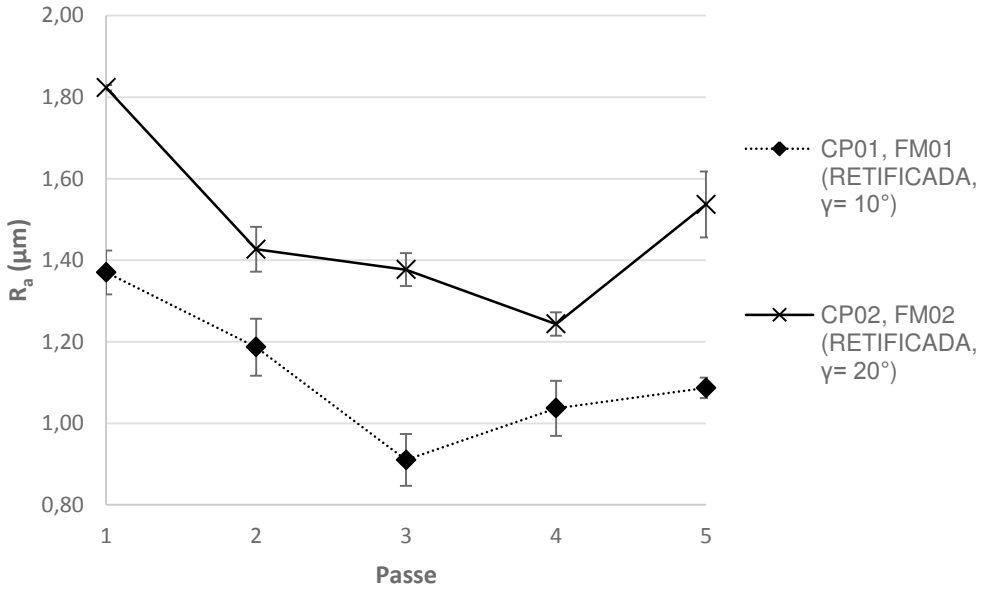
Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de prova.

Figura 4.8 - Rugosidade R_a dos corpos de prova (CP02, CP05 e CP06) em função dos passes de microtorneamento com ferramentas de aço rápido. Condições de usinagem (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev), CP02 usinado por FM02 (retificada, γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°), CP05 usinado por FM05 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s) e CP06 usinado por FM06 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s).

O comportamento irregular dos valores de R_a dos corpos de prova (CP02, CP05 e CP06) apresentados na Fig. 4.8 foi causado pela formação de cavacos contínuos em forma de fita que não sofreram ruptura total e se emaranharam na peça,

comprometendo o acabamento superficial. Ferraresi (1970), Diniz, Marcondes, Copinni, (2013) e Machado *et al.* (2015) afirmam que a ausência de controle do cavaco, quando em forma de fita, pode ocasionar danos físicos ao operador e causar danos a ferramenta, máquina-ferramenta e ao acabamento superficial do corpo de prova.

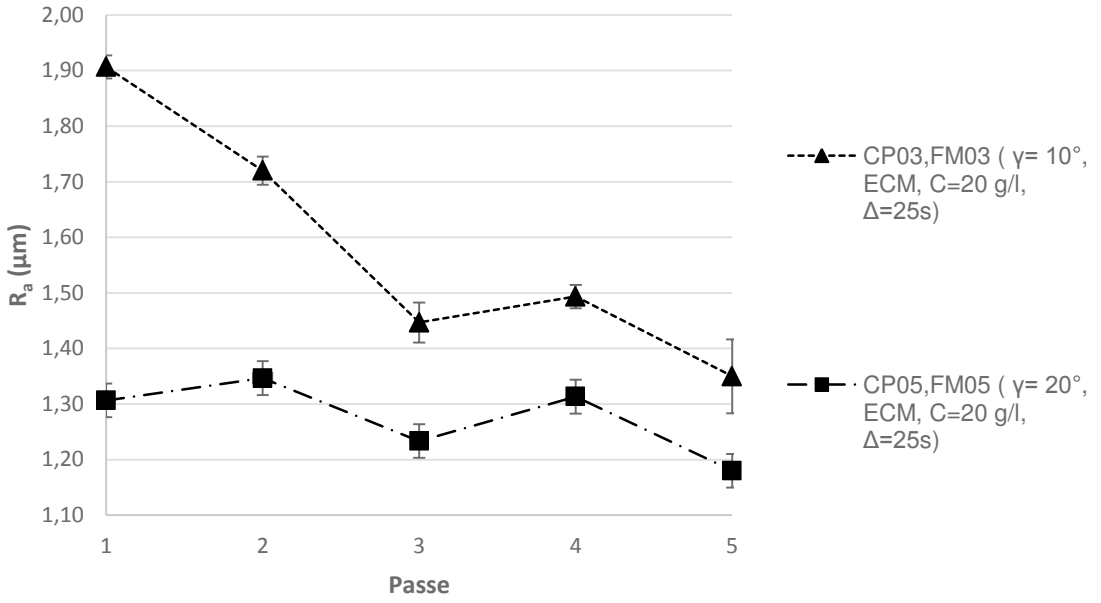
A Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, apresentam os corpos de prova que foram usinados em idênticas condições de corte por ferramentas com mesma preparação da aresta de corte, tendo uma única diferença o γ_o e o β_o da ferramenta.



Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de prova.

Figura 4.9 - Rugosidade R_a dos corpos de prova (CP1 e CP2) em função dos passes de microtorneamento com ferramentas de aço rápido. Condições de usinagem (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev), CP01 usinado por FM01 (retificada, γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) e CP02 usinado por FM02 (retificada, γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°).

Na Figura 4.9 são apresentadas as rugosidades dos corpos de prova que foram usinados pelas ferramentas que foram apenas retificadas. Percebe-se que a FM01 e a FM02 produziram comportamentos parecidos de rugosidade em seus respectivos corpos de prova em cada passe, mas a FM01 produziu os melhores valores de R_a nos corpos de prova que a FM02, não condizente com a literatura, porque quanto maior o γ_o, menor a força de usinagem, consequentemente menor a altura das ondulações e deflexões, ou seja, menor rugosidade.

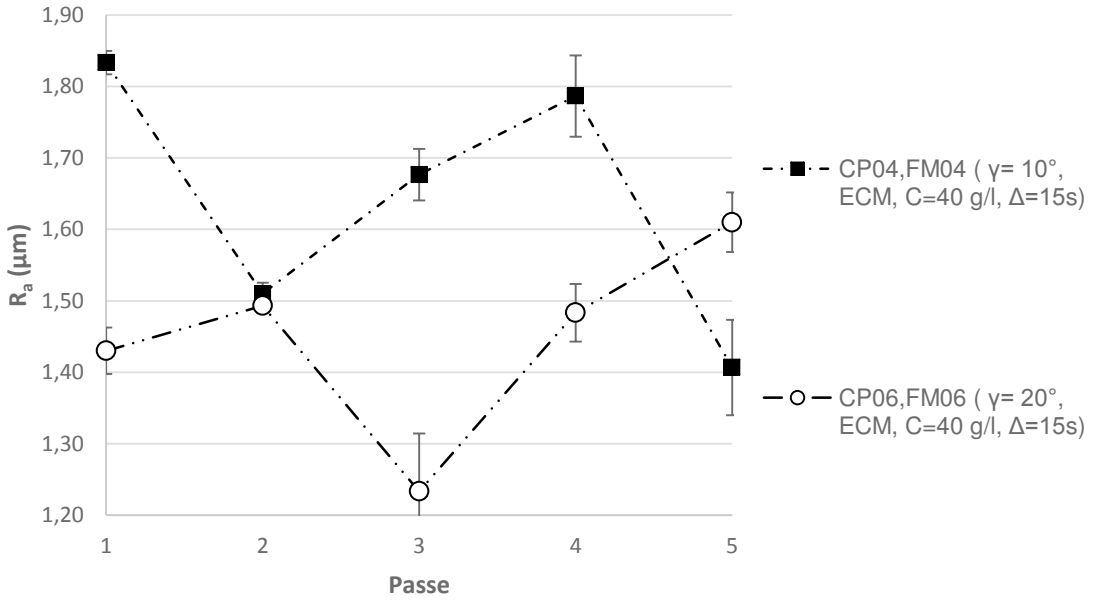


Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de prova.

Figura 4.10 - Rugosidade R_a dos corpos de prova (CP03 e CP05) em função dos passes de microtorneamento com ferramentas de aço rápido. Condições de usinagem (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev), CP03 usinado por FM03 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s) e CP05 usinado por FM05 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s.

A Figura 4.10 apresenta as rugosidades do CP03 e do CP05, após o microtorneamento em cinco passes. Assim como na Figura 4.9, percebe-se que o γ_o foi determinante para melhores resultados de acabamento superficial, uma vez que o CP03 apresentou maiores valores de R_a que o CP05 em todos os passes.

Segundo a Figura 4.10 pode-se observar que os valores começam com uma diferença alta no primeiro passe comparado ao último passe entre a CP03 e a CP05. Pode ser observado um comportamento muito parecido entre os valores de rugosidade do segundo passe em diante. Portanto, levando em consideração os métodos de preparação das ferramentas serem iguais, uma possível explicação é que a FM05, obteve um maior arredondamento da ponta de corte com a usinagem eletroquímica (ver Tab. 4.1) e isso foi significante para um melhor acabamento superficial em seu respectivo corpo de prova quando comparado a FM03.

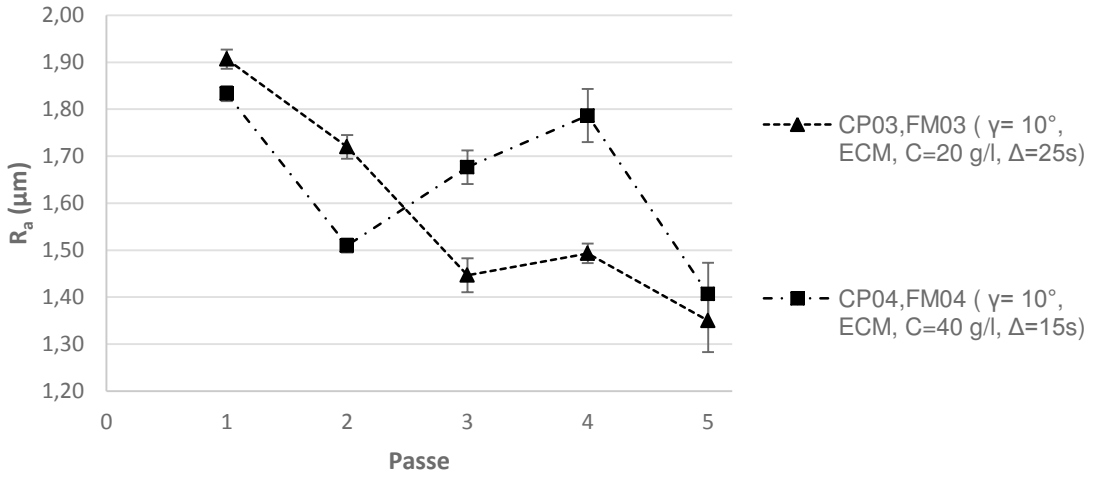


Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de prova.

Figura 4.11 - Rugosidade R_a dos corpos de prova (CP04 e CP06) em função dos passes de microtorneamento com ferramentas de aço rápido. Condições de usinagem (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev), CP04 usinado por FM04 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I = 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s) e CP06 usinado por FM06 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s).

Os resultados da rugosidade (R_a), produzidos pela FM04 e pela FM06 nos seus respectivos corpos de prova, não estabelecem uma relação de dominância de melhor acabamento superficial de um corpo de prova sobre o outro de um modo geral. Esses valores de R_a em alternância podem ter sofrido interferência da ação dos cavacos em forma de fita atritando na superfície recém-usinada.

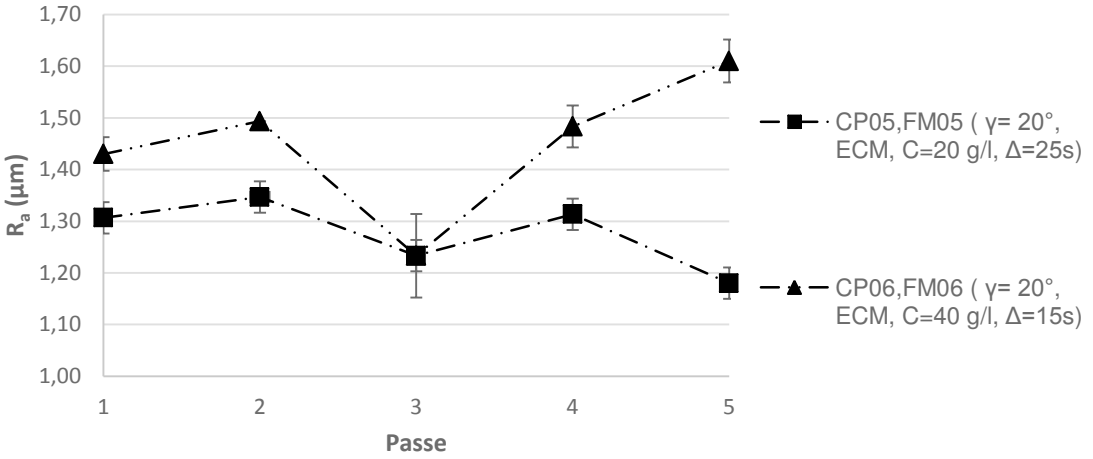
A Figura 4.12 e a Figura 4.13 apresenta os dados de rugosidade R_a em função dos passes de microtorneamento entre as ferramentas que passaram por usinagem eletroquímica e que possuem mesmo γ_o, mas concentrações diferentes de NaCl no eletrólito e tempo de ataque diferentes.



Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de prova.

Figura 4.12 - Rugosidade R_a dos corpos de prova (CP03 e CP04) em função dos passes de microtorneamento com ferramentas de aço rápido. Condições de usinagem (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev), CP03 usinado por FM03 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s) e CP04 usinado por FM04 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I = 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s).

O CP03 apresentou valores de rugosidade R_a maiores que o CP04 apenas no primeiro e no segundo passe. Vale ressaltar que durante o microtorneamento, em todos os passes também houve ocorrência do cavaco enrolando na peça, na ferramenta e nos componentes do minitorno.

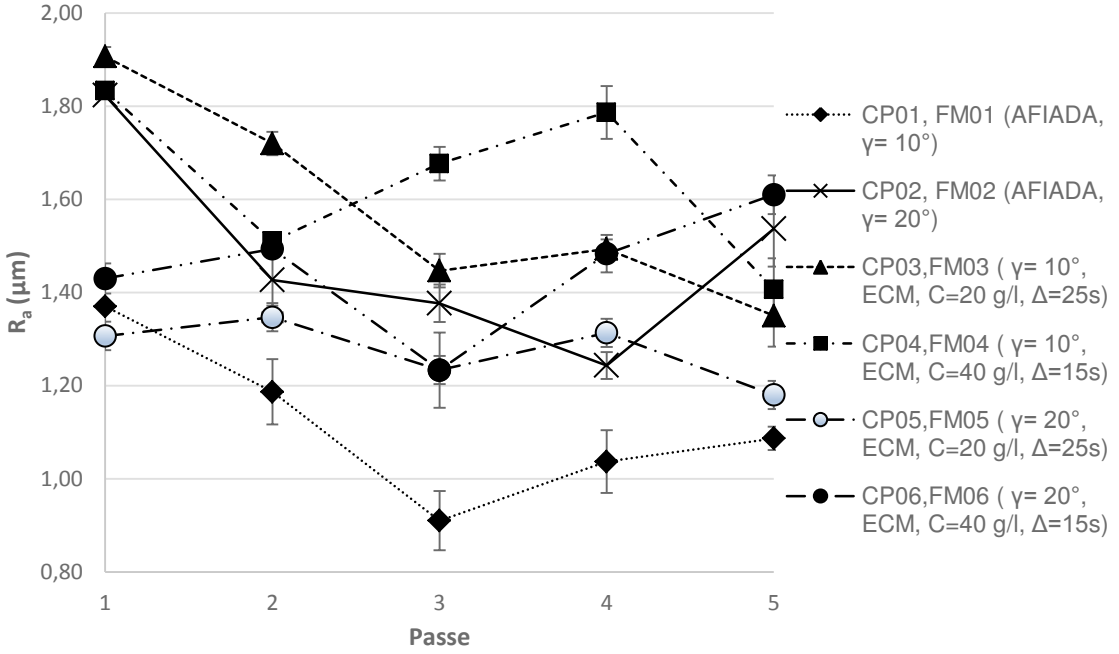


Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de prova.

Figura 4.13 - Rugosidade R_a dos corpos de prova (CP05 e CP06) em função dos passes de microtorneamento com ferramentas de aço rápido. Condições de usinagem (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev), CP05 usinado por FM05 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s) e CP06 usinado por FM06 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s).

O CP06 apresentou valores de rugosidade R_a maior que o CP05 nos primeiros dois passes e nos dois últimos. No terceiro passe as ferramentas produziram resultados similares. As rugosidades das duas ferramentas tiveram comportamentos parecidos até o quarto passe e a FM05 produziu melhores rugosidades que a FM06 em seus respectivos corpos de prova, podendo concluir que entre as ferramentas usinadas por eletroquímica, o eletrólito de concentração de 40 g/l de NaCl e tempo de ataque de 15 s proporcionou melhores rugosidades que as ferramentas que foram usinadas com eletrólito de 20 g/l e tempo de ataque de 25 s.

A Figura 4.14 apresenta a rugosidade R_a dos corpos de prova em função dos passes do microtorneamento.



Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de prova.

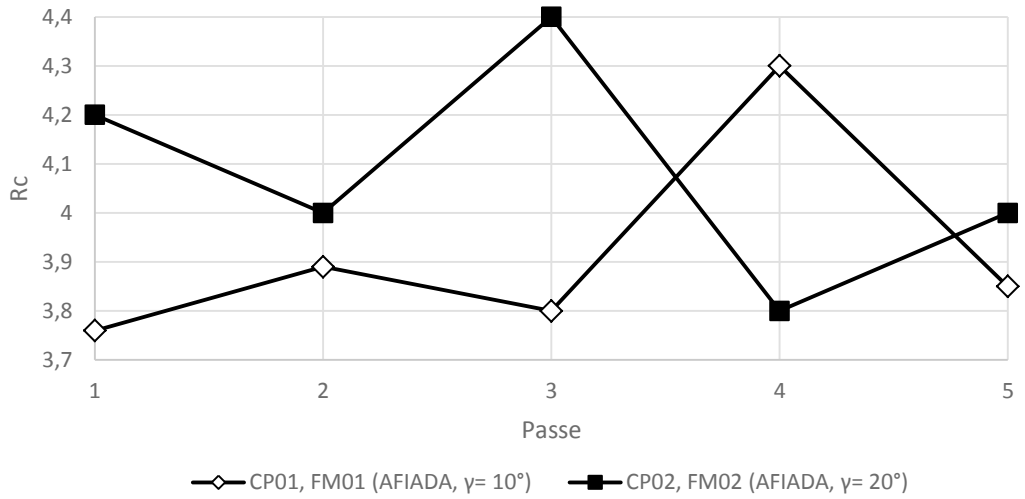
Figura 4.14 - Rugosidade R_a dos corpos de prova em função dos passes de microtorneamento com ferramentas de aço rápido. Condições de usinagem (V_c= 270 m/min, a_p= 0,2 mm, f_c= 0,05 mm/rev), CP01 usinado por FM01 (retificada, γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°), CP02 usinado por FM02 (retificada, γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°), CP03 usinado por FM03 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s), CP04 usinado por FM04 (γ= 10°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 75°, λ_s= 0°, α'_o= 5° , χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I = 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s), CP05 usinado por FM05 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s) e CP06 usinado por FM06 (γ_o= 20°, α_o= 5°, χ_r= 90°, ε_r= 60°, β_o= 65°, λ_s= 0°, α'_o= 5°, χ'_r= 30°) com preparação por usinagem eletroquímica (U= 20 V, I= 2 A, C= 40 g/l, Δt= 15 s).

Ao comparar os valores de R_a apresentados pela Fig. 4.14 obtidos por avaliação desses corpos de provas na Tabela 4.1, e relacionando com as respectivas ferramentas, de uma forma geral nota-se que as ferramentas que passaram por usinagem eletroquímica, produziram maiores valores de R_a, ou seja, o processo de retificação sobressaiu sobre as ferramentas que passaram por usinagem eletroquímica.

Todos os corpos de prova analisados ficaram com a R_a entre 0,91 µm a 2 µm e tiveram a interferência do cavaco emaranhando na peça, na ferramenta e nos componentes do minitorno, causando prejuízos na rugosidade superficial e influenciando os resultados.

4.5 Grau de Recalque

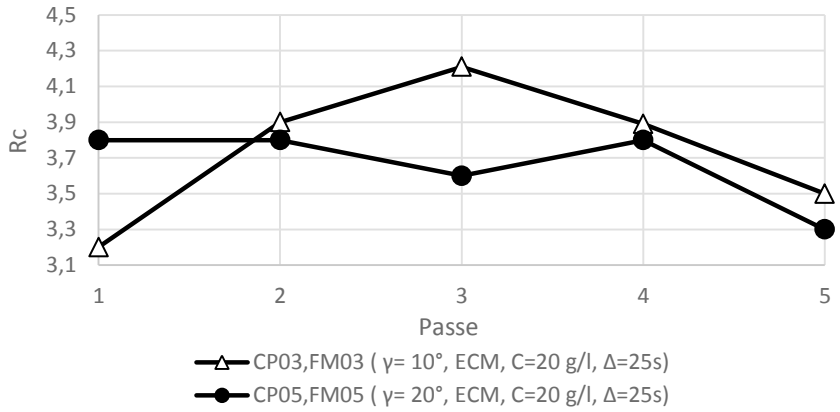
O grau de recalque (R_c) é um parâmetro indicador da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primária (MACHADO *et al.,* 2015). Novaes e Souza (2009) afirmam que a diminuição do γ_o da ferramenta, causa o aumento do grau de recalque e, consequentemente, uma redução da velocidade de saída do cavaco. Desta forma, após a medição da espessura das amostras de cavacos gerados nos ensaios de microtorneamento de alumínio, foi medido o grau de recalque em função de cada passe de usinagem, apresentados nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17.



Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de Prova.

Figura 4.15 – Evolução do grau de recalque (R_c) dos cavacos após cada passe do microtorneamento do alumínio AA1100 com as ferramentas de aço rápido. Condições de usinagem: V_C = 270 m/min, a_p = 0,2 mm, f = 0,05 mm/rev). CP01 usinado por FM01 (retificada, γ = 10°), CP02 usinado por FM02 (retificada, γ = 20°).

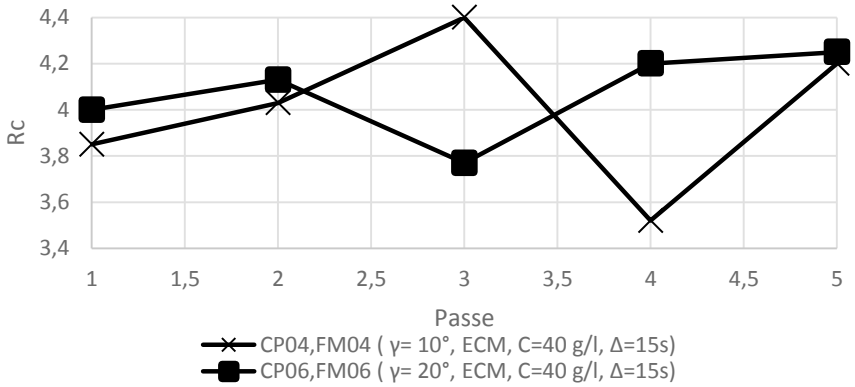
A figura apresenta a FM01 com graus de recalque menor que a FM02, salvo no quarto passe. Esse resultado não era esperado e não condiz com a literatura, pois como o γ_o da FM01 é menor que o γ_o da FM02, há uma maior restrição da passagem do cavaco, afetando diretamente na sua deformação.



Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de Prova.

Figura 4.16 – Evolução do grau de recalque dos cavacos após cada passe do microtorneamento do alumínio AA1100 com as ferramentas de aço rápido. Condições de Usinagem: V_C = 270 m/min, a_p = 0,2 mm, f_C = 0,05 mm/rev FM03 (γ = 10°) com preparação por usinagem eletroquímica (U = 20 V, I = 2 A, C = 20 g/l, Δt = 25 s) e FM05 (γ = 20°) com preparação por usinagem eletroquímica (γ = 10°, U = 20 V, I = 2 A, C = 20 g/l, Δt = 25 s).

A FM03 gerou maiores valores de grau de recalque que a FM05, salvo no primeiro passe. Esse valor de Rc no primeiro passe não condiz com a literatura, pois quando a ferramenta possui um maior γ, menor a deformação causada nesse cavaco.



Obs. FM: Ferramenta, CP: Corpo de Prova.

Figura 4.17 Evolução do grau de recalque dos cavacos após cada passe do microtorneamento do alumínio AA1100 com as ferramentas de aço rápido. Condições de Usinagem: V_C = 270 m/min, a_p = 0,2 mm, f = 0,05 mm/rev), FM04 (γ = 10°) com preparação por usinagem eletroquímica (U = 20 V, I = 2 A, C = 40 g/l, Δt = 15 s) e FM06 (γ = 20°) com preparação por usinagem eletroquímica (U = 20 V, I = 2 A, C = 40 g/l, Δt = 15 s).

O grau de recalque do cavaco na usinagem do CP04 é menor que o grau de recalque do cavaco na usinagem do CP06 pela FM 06, salvo no terceiro passe. Nesse caso também há contradição com a literatura, pois um maior γ facilita o fluxo do cavaco e reduz a deformação desse cavaco durante a usinagem.

Em todos as condições de microtorneamento do alumínio testadas houve a formação de cavaco contínuo, em forma de fita enrolado na ferramenta durante a usinagem e até se acumulando na interface cavaco-ferramenta, interferindo nos resultados.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

A partir dos resultados dos ensaios de microtorneamento do alumínio AA1100 com ferramentas de aço rápido ABNT M2 afiadas por retificação e texturizadas por diferentes condições de usinagem eletroquímica, as seguintes conclusões podem ser objetivamente inferidas:

I. O estado de hipótese não foi corroborado, pois a preparação da geometria de corte de aço rápido empregando a usinagem eletroquímica após a afiação por retificação em uma afiadora universal não influenciou positivamente o microtorneamento. Portanto, houve piora no acabamento superficial dos corpos de prova de alumínio AA1100.

II. A ferramenta FM01, com $\gamma = 10°$ preparada somente por retificação forneceu a melhor rugosidade do seu respectivo corpo de prova empregando os parâmetros de $V_c = 270$ m/min, $f = 0{,}05$ m/rev e $a_p = 0{,}2$ mm.

III. Dentre as condições de usinagem eletroquímica empregadas para preparar as ferramentas de corte, a condição que fez uso da concentração de 40 g/l de NaCl e $\Delta t = 15$ s sem água destilada produziu melhores resultados de microtorneamento do que a concentração de 20 g/l de NaCl e $\Delta t = 25$ s.

IV. O tempo de ataque da usinagem eletroquímica obteve maior influência na rugosidade da superfície da ferramenta que a concentração de NaCl no eletrólito.

V. Ambas as concentrações de eletrólito utilizadas foram suficientes para que houvesse rebarbação e arredondamento das arestas de corte e da ponta de corte.

VI. A usinagem eletroquímica foi responsável pela mudança da textura e da rugosidade das superfícies de saída e de folga das ferramentas.

VII. As ferramentas que passaram por usinagem eletroquímica não foram capazes de melhorar o acabamento superficial dos corpos de prova microtorneados. Os melhores resultados foram alcançados com as ferramentas somente retificadas, mesmo com a presença de rebarbas nas arestas de corte oriundas da afiação.

VIII. Entre as ferramentas que passaram somente pela afiação por retificação, a ferramenta 1 com $\gamma = 10°$ foi responsável pelos menores valores de rugosidade.

IX. Dentre as ferramentas preparadas com as mesmas condições de usinagem eletroquímica Condições de usinagem (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s) a menor rugosidade apresentada no seu respectivo corpo de prova foi alcançada com as ferramentas com $\gamma = 20°$.

X. O método de preparação da aresta de corte que ocasionou menor adesão/desgaste de alumínio na ferramenta foi a afiação por retificação (FM02) com $\gamma = 20°$ e a ferramenta com maior adesão/desgaste foi a FM04 com $\gamma = 10°$e usinado por eletroquímica com eletrólito (40 g/l de NaCl aquoso, (U= 20 V, I= 2 A, C= 20 g/l, Δt= 25 s).

XI. Todas as condições de microtorneamento avaliadas produziram cavacos do tipo contínuo e em forma de fita que se enrolou nos corpos de prova e comprometeram o acabamento superficial.

XII. A adesão de alumínio na superfície de folga dificultou a visualização do desgaste de flanco.

XIII. Os parâmetros de usinagem avaliados na usinagem do alumínio AA 1100 com ferramenta de aço rápido em todas as condições de preparação produziram adesão.

XIV. O grau de recalque é um bom indicador de deformação do cavaco no plano de cisalhamento primário, porém não foi eficaz para elucidar a influência da variação dos parâmetros de usinagem eletroquímica e de microtorneamento isoladamente.

Sugestões para trabalhos futuros

I. Empregar fluido de corte na afiação das ferramentas de aço rápido e rebolo de abrasivos de menor diâmetro médio, preferencialmente de superabrasivo.
II. Usar a usinagem eletroquímica não somente para texturizar a microgeometria, mas também a macrogeometria visando fabricar quebra-cavaco para aumentar o grau de recalque do cavaco para evitar o cavaco na forma de fita.
III. Avaliar a viabilidade técnica de outros eletrólitos e suas concentrações, tensão e corrente elétrica e tempos de ataque da usinagem eletroquímica.
IV. Avaliar a influência de outras geometrias e materiais de ferramenta de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. M. **Avaliação do Desgaste da Ferramenta de Metal Duro Revestida com Ti no Fresamento do Aço Abnt4140 Laminado a Quente e Temperado/Revenido.** 2010. 92 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Católica de Minas Gerais.

AMINI, S.; SOLEIMANIMEHR, H.; NATEGH, M. J.; ABUDOLLAH, A.; SADEGHI, M. H. FEM Analysis of Ultrasonic-Vibration-Assisted Turning and the Vibratory Tool. **Journal of Materials Processing Technology.** v. 201, n. 1-3, p. 43-47, 2008.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.271

AOSANI, G. F. **Construção De Um Dispositivo Para Usinagem Eletroquímica**. 2014 35 p., Trabalho Final de Curso – Faculdade Horizontina, Horizontina, Brasil.

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

ASTAKHOV, V. P. Metal Cutting Theory Foundations of Near-Dry (MQL) Machining. **International Journal of Machining and Machinability of Materials.** v. 7, n 1-2, 2010.

BHATTACHARYA, B.; MUNDA, J. Experimental Investigation on the Influence of Electrochemical Machining Parameters on Machining Rate and Accuracy in Micromachining Domain. **International Journal of Machining and Machinability of Materials.** v. 43, n. 13, p. 1301-1310, 2003.
DOI: https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00161-5

BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; DE CHIFFRE, L. Micromilling of Hardened Tool Steel for Mold Making Applications. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 167, n. 2-3, p. 201-207, ago. 2005.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.029

BLACKLEY, W. S.; SCATTERGOOD, R. O.; Ductile-regime Machining Model for Diamond Turning of Brittle Materials. **Precision Engineering.** v. 13, n. 2, p. 95-103, 1991.
DOI: https://doi.org/10.1016/0141-6359(91)90500-I

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

CHENG, K.; HUO, D. Micro-Cutting - Fundamentals and Applications. Ed. Wiley, United Kingdom, 2013, 366p.

COLDWELL, H. L.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K.; RENEVIER, N. M.; TEER, D. G. The Use of Softylubricating Coatings when Dry Drilling BS L168 aluminium alloy. **Surface and Coatings Technology**. v. 177–178, p.716-726, jan. 2004.

Da SILVA, I. F. P. **Avaliação da Qualidade de Micropeças Torneadas.** 2010. 102 f. Dissertação de Mestrado - Universidade de Aveiro.

Da SILVA, A. M. **Análise do Processo de Usinagem Eletroquímica.** 2011. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

Da SILVA, E. M.; TEIXEIRA R. L.; CRUZ, C.; PAVANIN, L. A. Estudo das Características de Eletrólitos de $NaNO_3$ e NaCl na Usinagem Eletroquímica do Aço-Rápido ABNT M2. **1° COFEB - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.** 8 f. 2001.

DIAS, E. A. **Monitoramento da Dressagem no Processo de Retificação *centerless* Utilzando Emissão Acústica.** 2013. 196 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São João Del-Rei.

DIN 4964-1. High Speed Tool Holder Bits. **German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung).** p. 3, 1962.

DING, H.; SHEN, N.; SHIN, Y. C. Modeling of Grain Refinement in Aluminum and Copper Subjected to Cutting. **Computational Material Science.** v. 50, n. 10, p. 3016-3025, 2011.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, L. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 8. ed. São Paulo: Art. Liber, 2013, 272p.

DINIZ, A. E. **Ensaio de Usinabilidade de Aço.** Departamento de Engenharia de Fabricação da UNICAMP, SP.1999.

DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y., Recent Advances in Mechanical Micromachining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 55, n. 2, p. 745-768, 2006.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.006

Dos ANJOS M. A. **Estudo Experimental do Uso de Rebolos Convencionais na Usinagem do Aço VP-50 Utilizado na Retificação Cilíndrica, Através de Diferentes Métodos de Lubri-Refrigeração.** 2015. 117 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

EMAG. ECM - Electro-Chemical Machining. Disponível em < https://www.emag.com/technologies/ecm-electro-chemical-machining.html> Acesso em 16 jun. 2018.

FAVORIT. AÇOS FERRAMENTAS - Aço rápido ABNT M2. Disponível em < http://www.favorit.com.br/produtos/acos-ferramenta/aco-rapido-m2> Acesso em 16 jun. 2018.

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

FERREIRA, V. N. A. P.; SANTOS, J. E. L. L.; OLIVEIRA, D.; FIOCCHI, A. A. Plano de Trabalho - Processos Híbrido de Microfresamento e Eletroquímica para Usinagem sem Rebarbas. **XXI Colóquio de Usinagem.** Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p. 1-4, 2017.

FILIZ, S.; CONLEY, C. M.; WASSERMAN, M. B.; OZDOGANLAR, O. B. An Experimental Investigation of Micro-Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro-End-Mills**. International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v. 47, n. 7-8, p. 1088-1100, 2007.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.024

FIOCCHI, A. A. **Estudo Experimental do Uso de Rebolos Convencionais na Usinagem do Aço VP-50 Utilizado na Retificação Cilíndrica, Através de Diferentes Métodos de Lubri-Refrigeração.** 2014. 327 f. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo.

FIOCCHI, A.A. **Notas de aula da disciplina Usinagem I – FEMEC41052.** Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, 2018.

FURUKAWA, Y.; MORONUKI, N. Effect of Material Properties on Ultra Precise Cutting Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology.** v. 37, n. 1, 1988.
DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61598-4

GONÇALVES, R. A. **Investigação da Usinabilidade das Ligas de Alumínio da Série 6XXX.** 2012. 124 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

GORLA, F. F. L. **Torneamento da Liga de Alumínio da Classe 6005 Utilizando Ferramenta Cerâmica.** 2015. 59 f. Trabalho de Conclusão do Curso - Universidade Estadual Paulista.

GRUPOALBAFER. FERRAMENTAS - Manuais - Corte - Fixação. Disponível em <http://www.grupoalbafer.com.br/catalogo/catalogo.pdf > Acesso em 16 jun. 2018.

HOFFMANN, T. C.; SOUZA, A. F.; SANTOS J. A. Comparação entre Centros de Usinagem CNC Para Microusinagem de Geometrias Complexas. 9° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2017
DOI: 10.26678/ABCM.COBEF2017.COF2017-0372

IMPERIO DOS METAIS. ALUMINIO 1100. Disponível em <http://www.imperiodosmetais.com.br/downloads/download_ficha_tecnica/aluminio/1100.pdf > Acesso em 16 jun. 2018.

ISO 3685. Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools. **International Organization for Standardization**, 54p, 1993.

JAIN, V. K.; RAJURKAR, K. P. An integrate approach for tool design in ECM. **Precision Engineering.** v. 13, n. 2, p. 111-124, 1991.
DOI: https://doi.org/10.1016/0141-6359(91)90502-A

JOHNE, P. **Aluminium Zentrade**, Machine of Products, 38 p., 1994.

JUN, M. B. G.; BOURNE, K.; DeVOR, R. E.; KAPOOR, S. G. Estimation of Effective Error Parameters in High-Speed Micro-Endmilling. **The International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v. 47, n. 9, p. 1449-1454, 2007

JUNIOR, A. B. **Investigação do Desgaste de Ferramentas de PCBN e Metal Duro no Fresamento de Topo de Açoes Endurecidos.** 1998, 118 f. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo.

KANG, I. S.; KIM, J. S.; KIM, J. H.; KANG, M. C.; SEO, Y. W. A. Mechanistic Model of Cutting Force in the Micro End Milling Process. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 187-188, n. 12, p. 250-255. 2007.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.155

KISWANTO, G.; ZARIATIN D. L.; KO, T. J. The Effect of Spindle Speed, Feed-Rate and Machining Time to the Surface Roughness and Burr Formation of Aluminum Alloy 1100 in Micro-Milling Operation. **Journal of Manufacturing Processes.** v. 16, n. 4, p. 435-450, 2014.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.05.003

KLOCKE, F.; KRATZ, H. Advanced Tool Edge Geometry for High Precision Hard Turning. **CIRP ANNALS - Manufacturing Technology.** v. 54, n. 1, p. 47-50, 2005.
DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60046-8

KOÇ, M.; ÖZEL, T. Fundamentals of Micro-Manufacturing. **Micro-Manufacturing: Design and Manufacturing of Micro-Products,** 2011, p. 1-23.
DOI: 10.1002/9781118010570.ch1

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren** (6nd Ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-07204-2

KUMAR, M., MAHTO, P. K., KUSHWAHA, D., SINGH, N. K. Electrochemical Machining: Review of Historical and Recent Developments. **International Journal of Advance Research in Science and Engineering**. v.5, p. 217 – 227, 2016.

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**. v. 126, n. 4, p. 666-678, 2004.
DOI: 10.1115/1.1813469

LIU, K.; MELKOTE, S. N. Effect of Plastic Side Flow on Surface Roughness in Micro-Turning Process. **Journal of Materials Processing Technology.** v. 46, n. 14, p. 1778-1785, 2006.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.11.014

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 3a Edição, Brasil, 2015, 407p.

MASUZAWA, T. State of the Art of Micromachining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 49, n. 2, p. 473-488, 2000.
DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63451-9

MELLO, A. V.; Da SILVA, B. R.; ARENCIBIA, R. V.; SILVA G. H.; SOUZA, M. N.; FERNANDES, L. A. Método das médias e amplitudes e análise de incerteza de medição dos ângulos de bits de HSS afiados com rebolo de Al_2O_3. **Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria.** v. 1, n. 1, 2015.
DOI: 10.5151/mathpro-cnmai-0156

Metals Handbook. **Machining**, v. 16, 9ª ed., p. 708 - 732, 1989

MIAN, J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. T. Identification of Factors That Dominate Size Effect in Micro-Machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v. 51, n. 5, p. 383-394, 2011.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.004

NETO, D. M. D.; BUZZATO, P. H. F.; REBELLO, R. C. **Substituição de um Processo de Rebarbação Manual por um Processo de Rebarbação Eletroquímica.** 2011. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

DA SILVA NETO, J. C., DA SILVA, M. B., MALAQUIAS, E., 2001, Análise Da Taxa De Remoção De Material E Da Rugosidade Média Na Usinagem Eletroquímica Do Aço Rápido ABNT M2, **Jornadas SAM - CONAMET - AAS** 2001, p. 633–640.

NETO, J. C. S.; CARRIJO, A. S.; SILVA, E. M.; SILVA, M. B. Estudo Da Taxa De Remoção De Material E Da Rugosidade Média Na Usinagem Eletroquímica De Aço Inoxidável. **13º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.** 8 f. 2003.

NETO, J.C. Da S.; Da SILVA, E. M.; Da SILVA, M. B. Análise da Rugosidade Aritmética Produzida pela Usinagem Eletroquímica do Aço-Válvula. **4° COFEB - 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Cod.** 011065195, 2007.

NETO, J. C. Da S.; Da SILVA, M. B. Retificação do Aço Rápido ABNT M6 com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico (CBN) e Óxido de Alumínio (Al_2O_3). **1° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.** p. 1-8, 2001.

NOVAES, F. B.; SOUZA, R. A. **Análise da Formação do Cavaco no Torneamento do Alumínio Utilizando Câmera de Alta Velocidade.** 2009. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Espírito Santo.

OLIVEIRA, F. B. **Estudos dos Mecanismos governantes do Efeito de Escala na Microusinagem.** 2012. 92 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

ÖZEL, T.; KARPAT, Y.; SRIVASTAVA, A. Hard Turning with Variable Micro-Geometry PCBN Tools. **CIRP ANNALS - Manufacturing Technology.** v. 57, n. 1, p. 73-76, 2008.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.063

PILJEK, P.; KERAN, Z.; MATH, **M. Micromachining – Review of Literature from 1980 to 2010**. 2014. p 1-27. Interdisciplinary Description of Complex Systems. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture – University of Zagreb.
DOI: 10.7906- indecs.12.1.1

QIN Y.; BROCKET A.; MA Y.; RAZALI A. ZHAO J.; HARRISON C.; PAN W.; DAI X. ; LOZIAK D. Micro-manufacturing: research, technology outcomes and development issues. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** v. 47, n.º9-12, p. 821-837, 2010.
DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-009-2411-2

RAHMAN, M. ASAD, A. B. M. A.; MASAKI, T.; SALEH, T.; WONG, Y. S.; SENTHIL KUMAR, A. A Multiprocess Machine Tool for Compound Micromachining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v. 50, n. 4, p. 344-356, 2010.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.007

RAJURKAR, K. P.; LEVY, G.; MALSHE, A.; SUNDARAM, M. M.; MCGEOUGH, J.; HU, X.; RESNICK, R.; DaSILVA, A. Micro and Nano Machining by Electro-Physical and Chemical Processes. **CIRP ANNALS - Manufacturing Technology.** v. 55, n. 2, 2006.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.002

RAMESH, V. Cutting Edge Preparation. **Proceeding of 09 IRF International Conference.** .p. 26-30, 2014.

REIS, A. M. **Influência do Ângulo de Posição Secundário da Ferramenta, Raio de Ponta e Lubrificação na Usinagem em Presença de Aresta Postiça de Corte.** 2000. 88 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

ROBINSON, G. M.; JACKSON, M. J.; WHITFIELD, M. D. A Review of Machining Theory and Tool Wear with a View to Developing Micro and Nano Machining Processes. **Journal of Materials Science.** v. 42, n. 6, p. 2002-2015, mar. 2007. DOI: https://doi.org/10.1007/s10853-006-0171-z

ROHLOFF, R. C. Efeito dos Parâmetros de Corte no Fresamento do Aço Inoxidável AISI 420 para Moldes e Matrizes. 2012. 83 f. Dissertação de Mestrado - Sociedade Educacional de Santa Catarina - Sociesc.

ROSA, G. C. **Estudo da Usinabilidade no Torneamento a Seco do Aço Inoxidável Martensítico AISI 420 C Endurecido com Ferramenta de Metal-Duro.** 2017. 138 f. Dissertação de Doutorado - UNIVERSIDADE Federal do Rio Grande do Sul.

ROY, P.; SARANGI, S. K.; GHOSH, A.; CHATTOPADHYAY, A. K. Machinability Study of Pure Aluminium and Al-12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**. v. 27, n. 3, p. 535-544, may 2009.

RUSSELL, J. B. **Química Geral – Eletroquímica.** MAKRON Books do Brasil Editora Ltda, Tradução e Revisão de Márcia Guekezian *et al*. 1994, São Paulo, Brasil, p. 867-912.

POPOV, K. B.; DIMOV, S. S.; PHAM, D. T.; MINEV, R. M.; ROSOCHOWSKI, A. OLEJNIK, L. Micromilling: material microstructure effects. **Proceedings of the I MECH E Part B Journal of Engineering Manufacture.** v. 220, n. 11, p. 1807-1813, 2006. DOI: https://doi-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/10.1243/09544054JEM683

SANDIVIK. Raio de Ponta da Pastilha. Disponível em <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/insert-information/insert-nose-radius> Acesso em 16 jun. 2018.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais.** Aritliber Editora, São Paulo – SP, Brasil, 2007, 246p.

SATO, M.; YAMAZAKI, T.; SHIMIZU, Y.; TAKABAYASHI, T. A Study on the Microcutting of Aluminum Single Crystals. **JSME International Journal. Ser. 3, Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry.** v.34, n. 4, p. 540-545, 1991.
DOI: https://doi.org/10.1299/jsmec1988.34.540

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. Oxford University Press, Londres, 1986, 256p.

SIDDHPURA, A.; PAUROBALLY, R. A Review of Flank Wear Prediction Methods for Tool Condition Monitoring in a Turning Process. **The International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v. 65, n. 1-4, p. 371-393, 2012.
DOI: https://doi-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00170-012-4177-1

SIMONEAU, A.; NG, E.; ELBESTAWI, M. A. Grain Size and Orientation Effects When Microcutting AISI 1045 Steel. **CIRP ANNALS - Manufacturing Technology.** v.56, n. 1, p. 57-60, 2007.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.016

SILVA, N. S.; Adaptação de Minitorno De Bancada Para Microtorneamento CNC. Edital **Nº 04/2017 - Programa de Iniciação Científica PIBIC-EM-CNPq/UFU**. Iniciação Científica em Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

SOUZA, M. N.; Da SILVA, M. A.; SOUZA, J. A.; BARROZO, M. A. S.; MACHADO, A. R. Relação entre as Propriedades Mecânicas das Ligas de Alumínio e o Grau de Recalque. 7° **Congreso Brasileiro de Engenharia De Fabricação- ABCM,** Universidade Federal de Uberlândia. 9 f., 2013

SREEJITH, P. S. Machining of 6061 Aluminum Alloy with MQL, Dry and Flooded Lubrificant Conditions. **Materials Letters.** V. 62, n. 2, p. 276-278, jan. 2008.

STAROVEŠKI, T.; BREZAK, D.; UDILJAK, T. LinuxCNC – The enhanced Machine controller: Application and na overview. **TehničkiVjesnik: Technical Gazette,** Osijek, Croácia, v. 1110, n. 1103, p.1-8, 2013.
DOI: https://hrcak.srce.hr/112334

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Development of a Cutting Tool with a Nano/micro-textured surface-Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns. **Precision Engineering.** v. 33, n. 4, p. 425-429, 2009.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.009

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Performace of Cutting Tools with Dimple textured surfaces: A comparative study of diferente texture patterns. **Precision Engineering.** v. 49, p. 52-60, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.004

TOROPOV, A.; KO, S. L.; KIM, B. K. Experimental Study of Burrs Formed in Feed Direction When Turning Aluminum Alloy Al6061-T6. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v.45, n. 9, p. 1015-1022, 2005.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.031

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th Ed., Butterworth, Boston, USA. 2000, 446p.

VENDRAME, S. Estudo da integridade da aresta de macho de corte de HSS durante a retificação em várias condições de corte 2015. 142 f. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, Brasil.

VENDRAME, S.; OLIVEIRA, D.; PARANAÍBA, R. S.; Da SILVA, R. B. Influência da Queima de Retificação em Aço Rápido na Energia Específica de Riscamento. **POSMEC 2014 - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.** 2014.

VILLARESMETALS. Aço rápido ABNT M2. Disponível em <http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Rapidos/VWM2> Acesso em 16 jun. 2018.

ZIBEROV, M.; CUNHA, D. F.; SILVA, M. B.; HUNG, W. N. P.; JACKSON, M. J. Principais Aspectos do Processo de Microusinagem. **Máquinas e Metais.** v. 52, p. 28-37, 2016a.

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

WALSH, R. A.; CORMIER, D. R. **Machining and metalworking handbook**. 3. ed. USA: The McGraw Hill Companies, 2006.

WITTING, H. Torneamento de superligas. Máquinas e Metais, v. 38 (440), p 156 – 165, 2002

WU, X.;LI, L.; HE, N.; YAO, C.; ZHAO, M. Influence of the Cutting Edge Radius and the Material Grain Size on The Cutting Force in Micro Cutting. **Precision Engineering.** v. 45, p. 359-364, 2016.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.03.012

YAN, J.; ZHANG, Z.; KURIYAGAWA, T. Mechanism for Material Removal in Diamond Turning of Reaction-Bonded Silicon Carbide. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v. 49, n. 5, 2009.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.12.007

Apêndice A: Análises de MEV-EDS das ferramentas de corte

São apresentados neste apêndice as imagens das ferramentas, seguido da tabela de composição química obtida por MEV-EDS.

Na Figura 1 é apresentada a análise de EDS em várias regiões da superfície de folga da ferramenta FM01 delimitadas e numeradas.

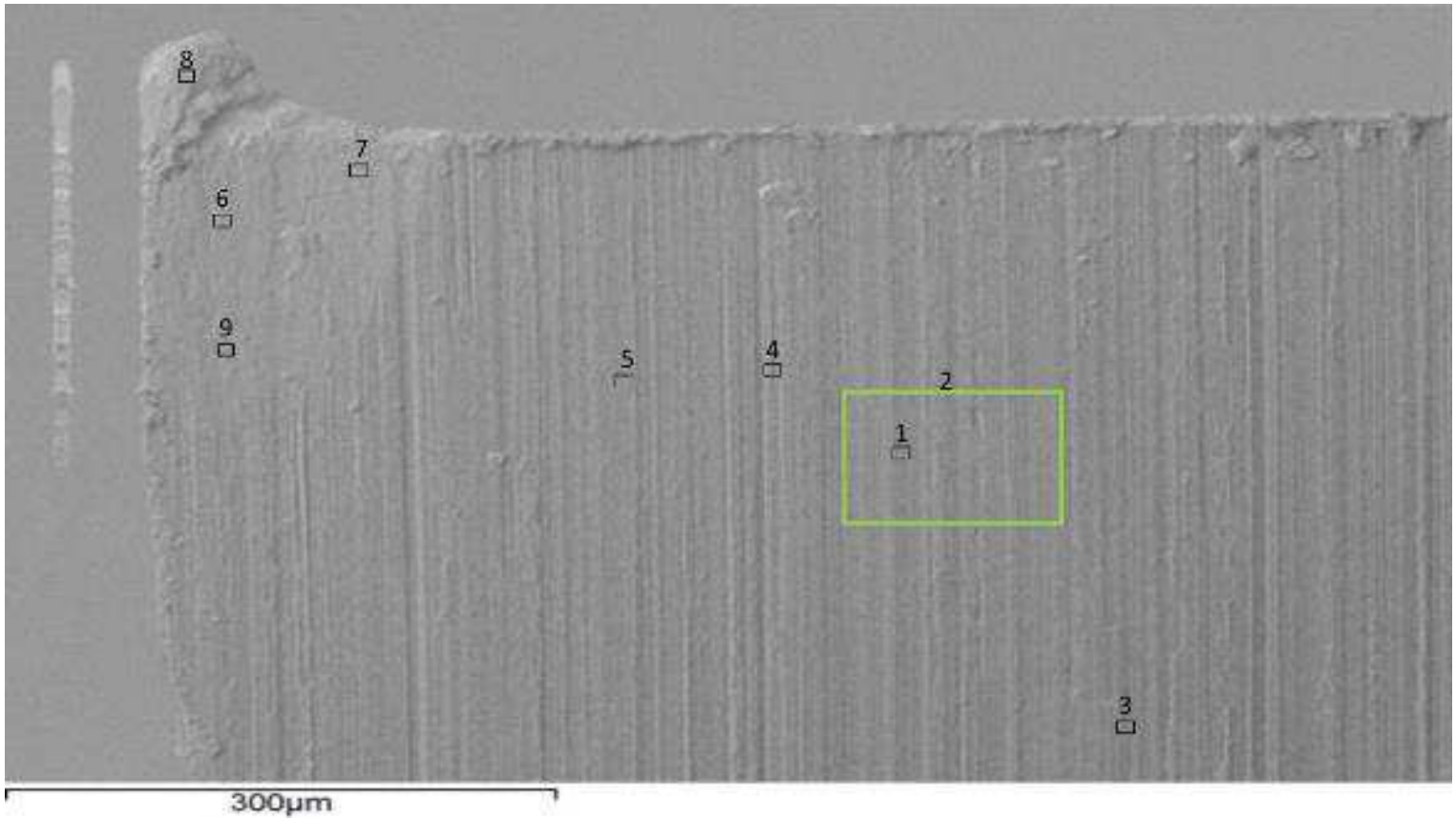


Figura 1- Imagem obtida pelo MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM01.

Tabela 1 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 1

FM01-Superfície de folga

Elementos %(peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	6.281	0.000	7.225	0.357	0.079	0.310	18.434	9.833	3.946	50.582	1.503	0.120	0.000	1.330
Espectro 2	5.941	0.013	6.952	0.426	0.083	0.280	15.931	9.822	2.698	56.183	0.851	0.135	0.000	0.685
Espectro 3	2.828	0.022	4.608	0.309	0.023	0.159	13.594	10.619	6.643	57.786	2.507	0.348	0.000	0.555
Espectro 4	4.919	0.000	5.710	0.331	0.000	0.389	12.918	12.007	0.000	58.080	0.000	0.000	2.082	3.565
Espectro 5	7.590	0.125	5.207	0.331	0.000	0.000	23.465	12.907	5.652	41.711	1.238	0.092	1.257	0.424
Espectro 6	4.708	0.138	58.784	0.524	0.000	0.650	17.563	8.425	3.765	3.306	1.141	0.151	0.000	0.844
Espectro 7	7.391	0.056	44.475	1.708	0.000	0.000	21.845	9.751	5.692	7.862	0.538	0.188	0.492	0.000
Espectro 8	2.235	0.067	75.289	0.118	0.331	0.000	11.572	3.481	2.643	2.790	0.385	0.104	0.560	0.422
Espectro 9	1.858	0.048	65.499	0.516	0.058	0.189	15.724	5.506	5.930	2.731	1.068	0.000	0.000	0.872

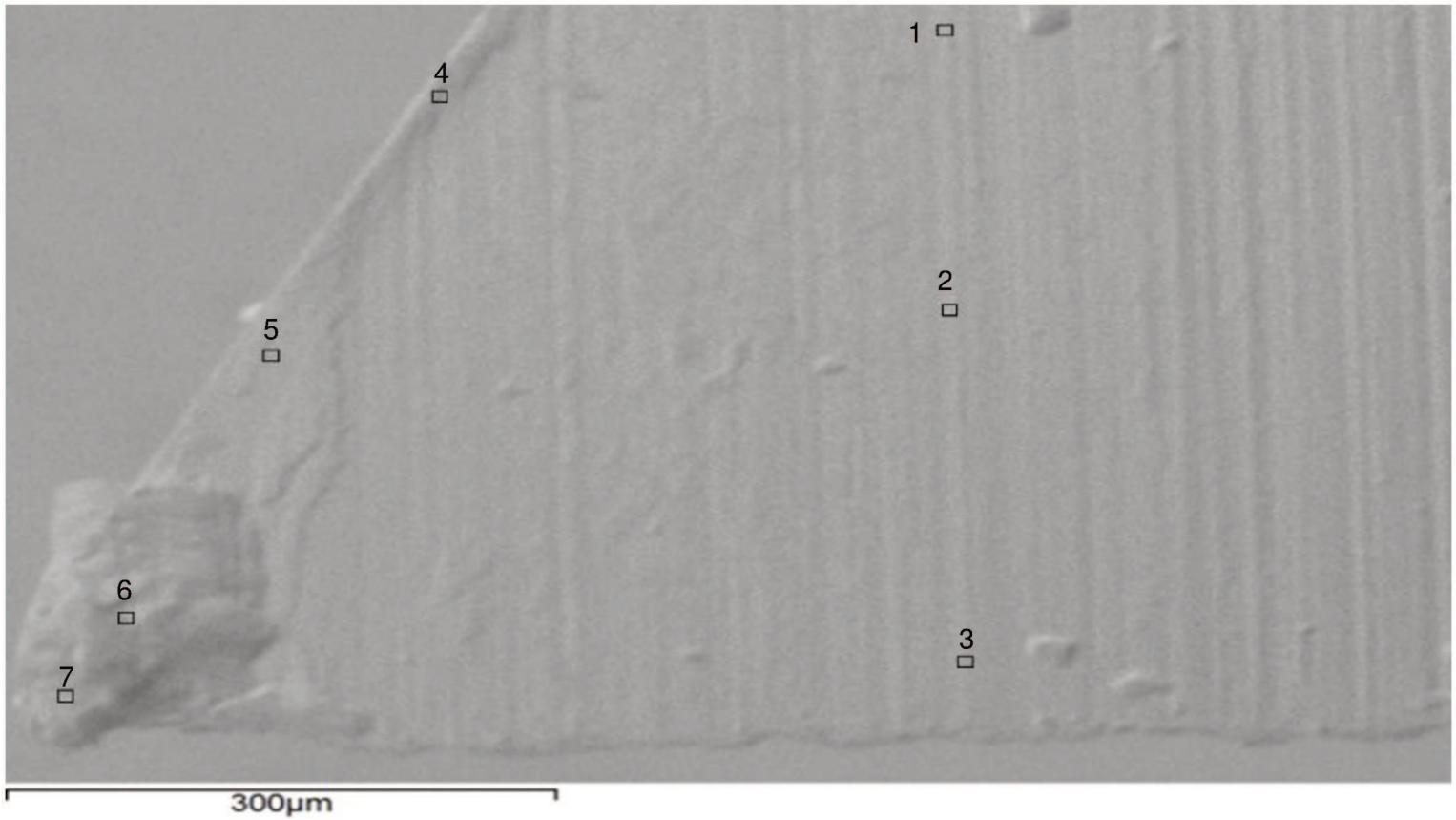


Figura 2- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM01.

Tabela 2 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 2.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	7.884	0.000	35.490	0.609	0.000	0.000	18.969	7.061	0.895	27.060	0.222	0.000	1.299	0.512
Espectro 2	4.370	0.000	5.015	0.763	0.115	0.000	14.930	10.214	4.467	57.260	1.047	0.123	0.700	0.998
Espectro 3	5.601	0.093	5.483	0.495	0.122	0.000	14.957	10.208	2.265	56.937	1.283	0.000	1.260	1.295
Espectro 4	10.019	0.414	15.218	1.626	0.238	0.146	22.917	11.167	2.424	35.134	0.000	0.000	0.000	0.697
Espectro 5	3.255	0.161	72.284	0.949	0.227	0.000	13.039	3.535	2.680	2.374	0.435	0.266	0.795	0.000
Espectro 6	14.475	0.896	37.164	0.000	0.166	0.512	13.138	0.000	12.306	18.338	0.239	0.208	0.000	2.558
Espectro 7	4.924	0.000	70.066	0.382	0.000	0.000	13.915	6.732	1.562	1.581	0.449	0.000	0.000	0.390

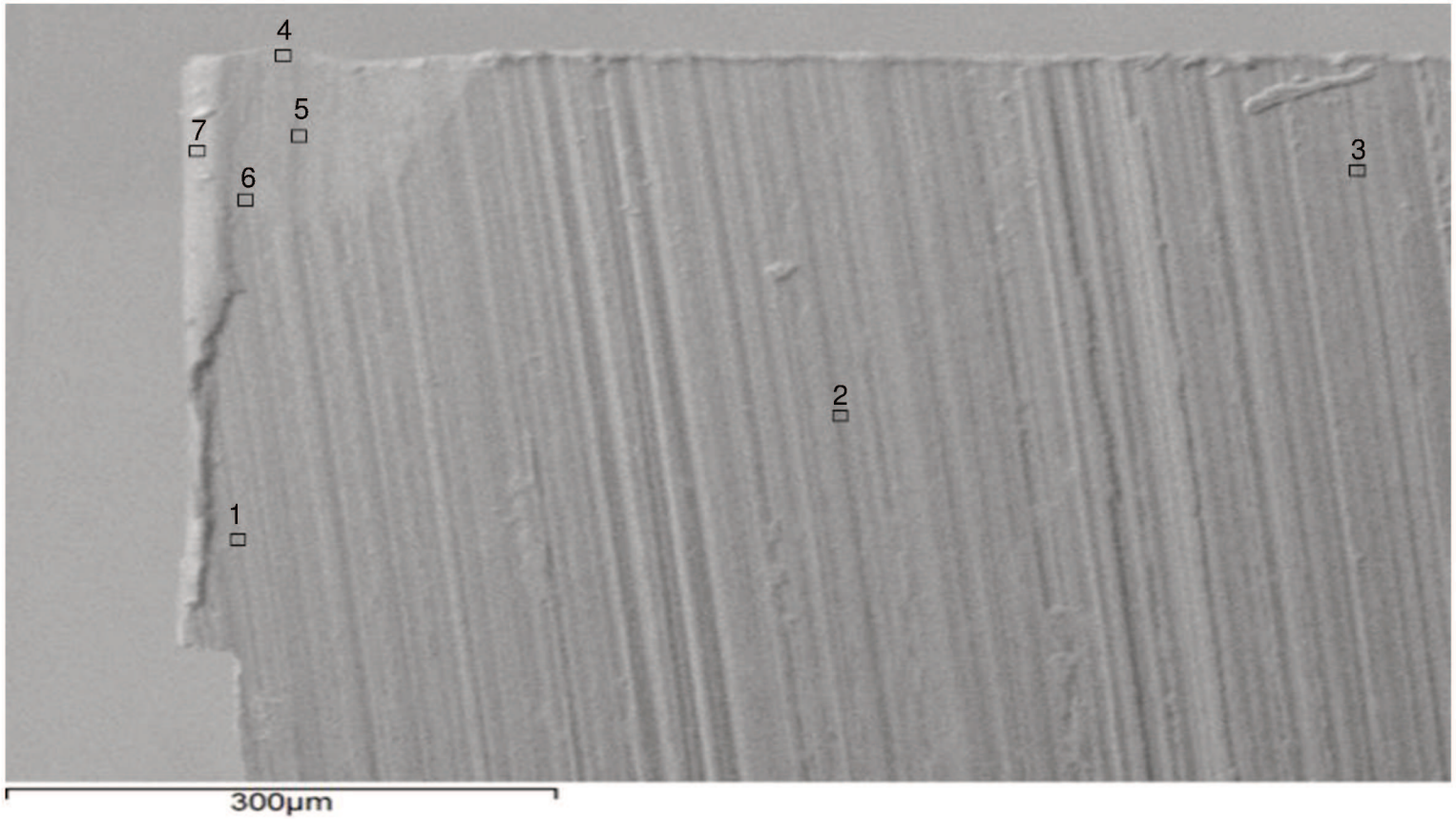


Figura 3- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM02.

Tabela 3 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 3.

FM01-Superfície de folga

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	3.795	0.193	0.892	0.184	0.061	0.000	15.473	12.375	3.931	56.693	1.344	0.306	2.527	2.226
Espectro 2	5.974	0.026	3.389	0.156	0.213	0.215	19.637	10.843	3.516	48.732	0.418	0.176	2.960	3.746
Espectro 3	6.429	0.188	2.734	0.000	0.187	0.000	24.364	14.116	5.216	38.957	1.021	0.000	3.303	3.485
Espectro 4	11.700	0.000	51.513	0.770	0.157	0.017	24.600	6.448	2.626	2.039	0.130	0.000	0.000	0.000
Espectro 5	7.659	0.083	53.008	0.859	0.218	0.640	21.526	8.738	2.601	3.617	0.367	0.181	0.000	0.502
Espectro 6	3.563	0.000	8.691	0.758	0.104	0.000	14.212	10.297	2.960	54.084	0.526	0.000	1.811	2.995
Espectro 7	9.334	0.000	42.361	0.825	0.000	0.000	23.034	6.673	3.089	12.576	0.353	0.016	0.673	1.066

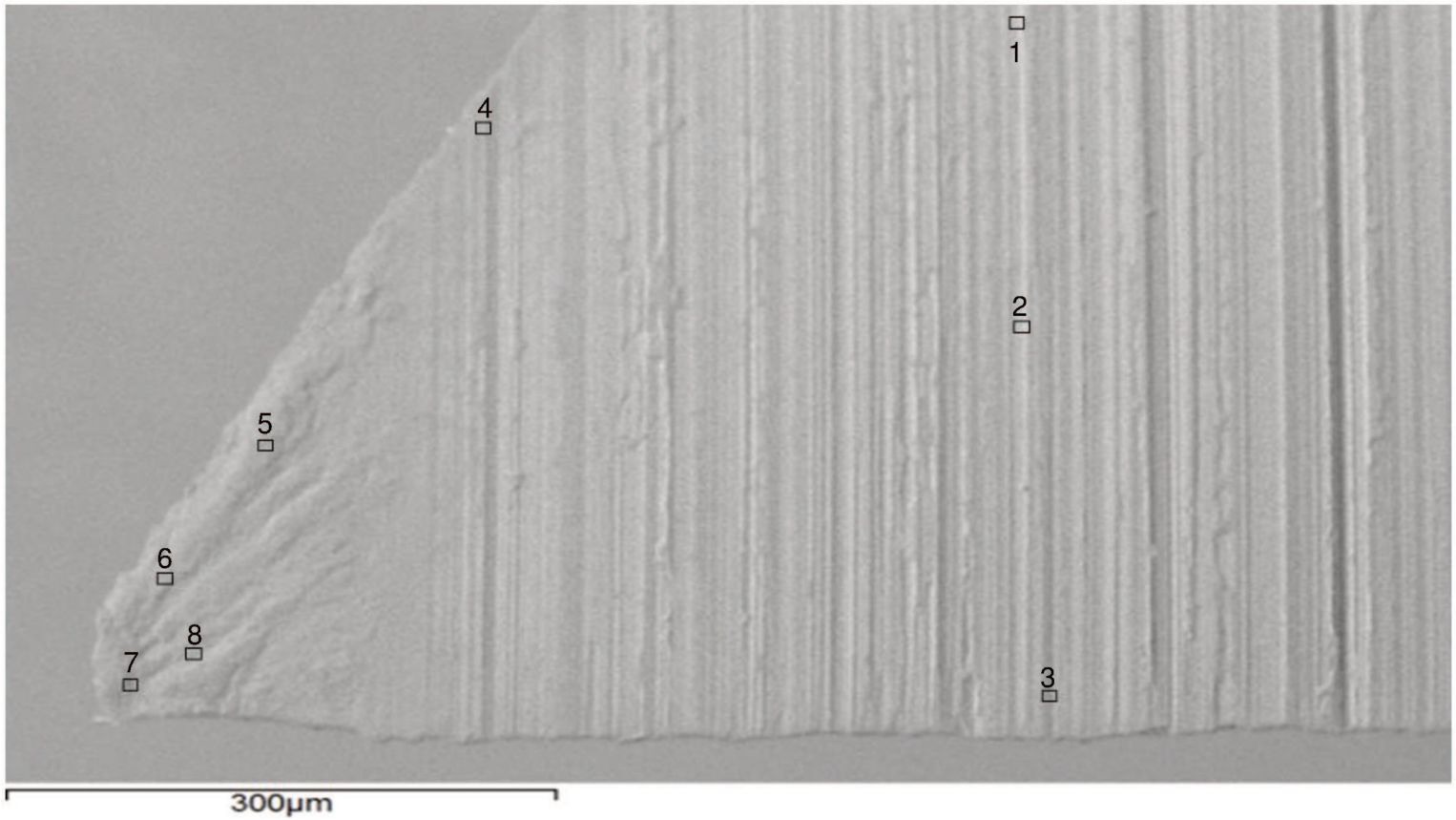


Figura 4- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM02.

Tabela 4 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 4.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	3.018	0.063	0.994	0.061	0.000	0.034	10.132	6.889	1.236	67.136	1.850	0.160	3.269	5.157
Espectro 2	3.401	0.020	2.906	0.135	0.000	0.000	12.360	8.731	6.183	57.202	1.075	0.367	3.776	3.845
Espectro 3	9.479	0.136	9.482	0.390	0.023	0.270	19.897	10.486	0.578	44.943	1.366	0.146	0.806	1.999
Espectro 4	18.854	0.037	27.101	1.077	0.000	0.000	31.150	12.254	1.663	5.580	0.220	0.000	1.511	0.553
Espectro 5	4.301	0.000	60.255	0.621	0.254	0.000	16.442	7.302	4.099	3.234	0.804	0.155	2.532	0.000
Espectro 6	12.464	0.308	38.968	0.352	0.102	0.000	27.874	9.342	5.482	3.117	1.267	0.175	0.229	0.320
Espectro 7	4.749	0.000	66.275	0.528	0.000	0.000	14.088	5.543	3.344	2.532	0.899	0.377	1.174	0.492
Espectro 8	4.490	0.033	58.014	0.610	0.000	0.038	17.766	8.132	6.137	2.819	1.315	0.367	0.007	0.271

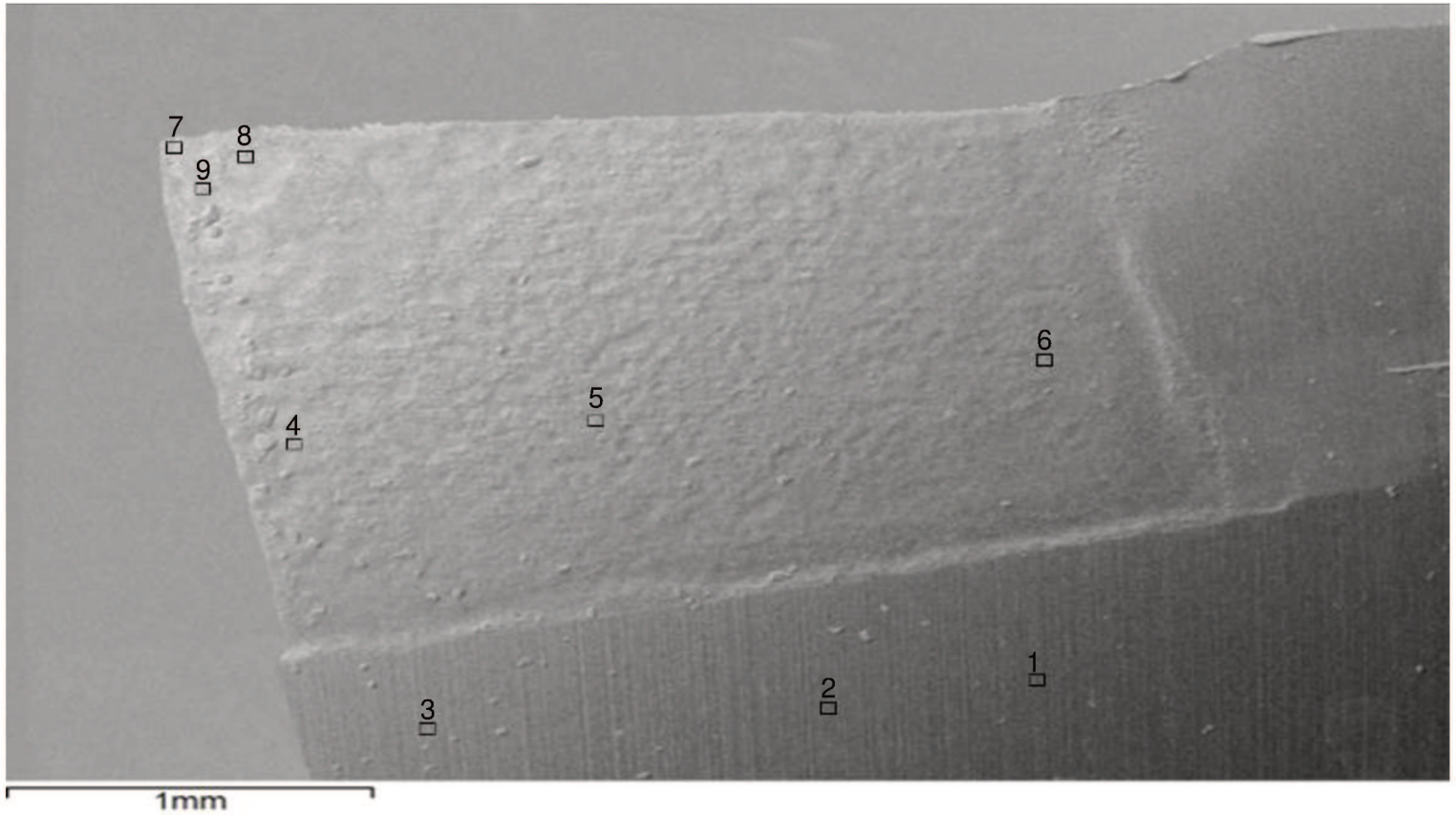


Figura 5- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM03.

Tabela 5 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 5.

FM01-Superfície de folga

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	8.643	0.090	10.745	0.343	0.071	0.460	25.856	13.153	4.344	33.012	1.366	0.617	0.000	1.302
Espectro 2	2.400	0.000	1.979	0.070	0.157	0.323	17.166	13.356	6.757	50.649	1.806	0.705	1.604	3.029
Espectro 3	7.695	0.188	10.330	0.508	0.000	0.420	22.663	10.825	4.744	38.843	1.384	0.307	0.390	1.703
Espectro 4	14.468	0.096	13.351	0.281	0.000	0.143	29.716	14.129	1.362	23.475	1.021	0.068	0.687	1.203
Espectro 5	9.096	0.507	7.025	0.162	0.105	0.038	24.029	14.252	0.350	36.643	0.613	0.000	3.520	3.660
Espectro 6	11.259	0.734	4.420	0.000	0.000	0.604	29.667	17.507	3.451	18.663	1.396	0.129	4.885	7.285
Espectro 7	10.800	0.330	40.772	0.630	0.000	0.317	25.122	9.699	5.325	5.021	1.188	0.578	0.000	0.219
Espectro 8	5.493	0.277	15.418	0.383	0.000	0.874	20.781	14.994	3.945	34.608	0.408	0.230	0.086	2.503
Espectro 9	6.189	0.080	32.546	0.531	0.105	0.163	21.972	14.754	4.728	15.130	1.976	0.320	0.397	1.108

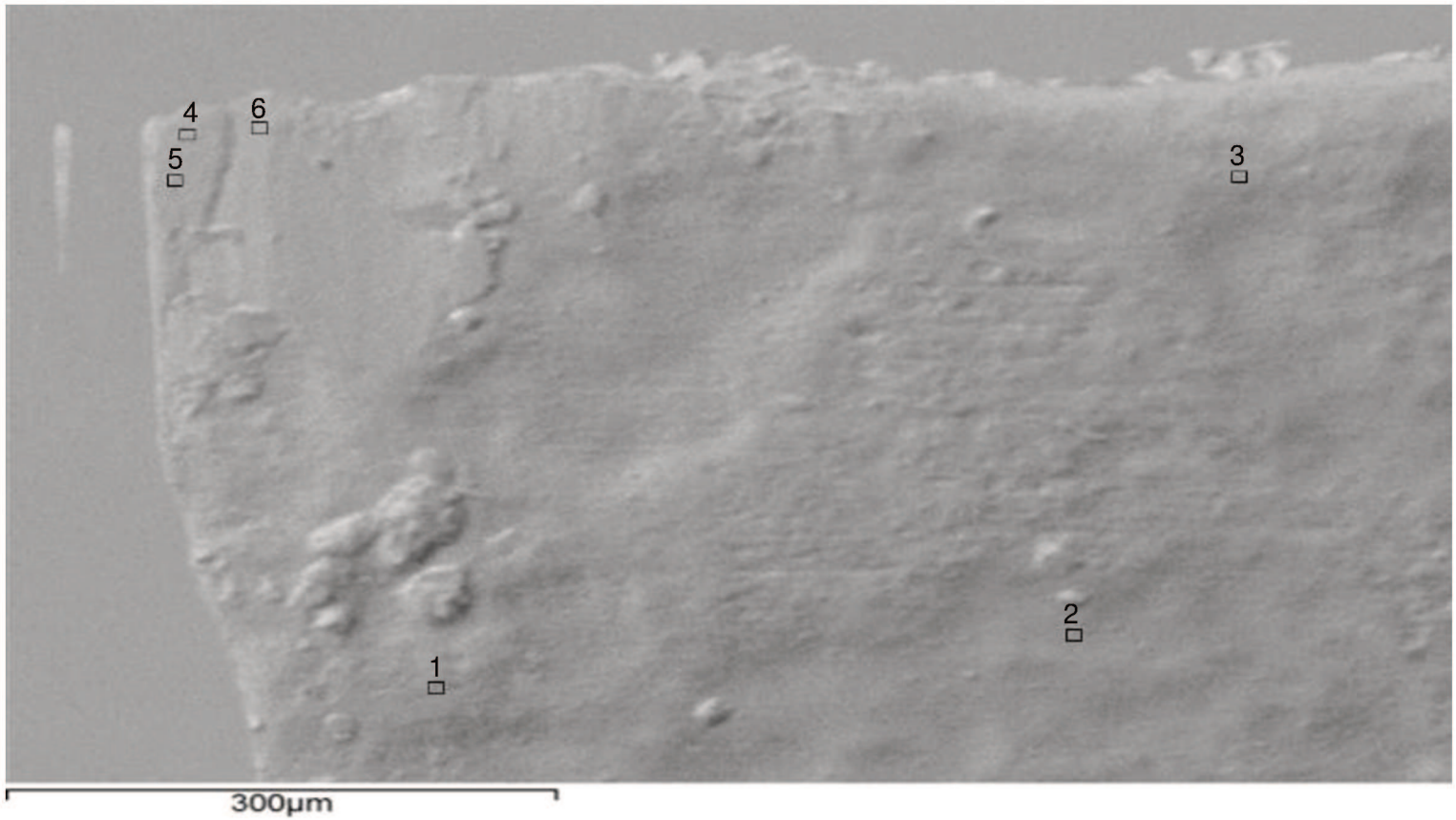


Figura 6- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM03.

Tabela 6 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 6.

FM01-Superfície de folga

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	7.804	0.748	12.672	0.082	0.213	1.090	23.406	8.690	5.491	24.875	0.876	0.396	3.077	10.579
Espectro 2	9.531	0.471	13.142	0.078	0.157	0.000	23.322	14.071	0.285	30.467	0.156	0.000	4.205	4.113
Espectro 3	25.407	0.699	27.198	0.275	0.147	0.000	34.463	7.197	1.352	1.080	0.048	0.000	1.652	0.482
Espectro 4	6.992	0.103	37.602	0.435	0.000	0.000	25.640	12.776	7.525	5.415	1.666	0.504	1.120	0.222
Espectro 5	8.518	0.135	53.985	0.457	0.000	0.000	21.650	7.226	3.682	2.486	0.197	0.000	1.056	0.607
Espectro 6	6.509	0.178	64.011	0.872	0.000	0.000	15.387	4.381	3.037	2.691	1.091	0.618	0.690	0.534

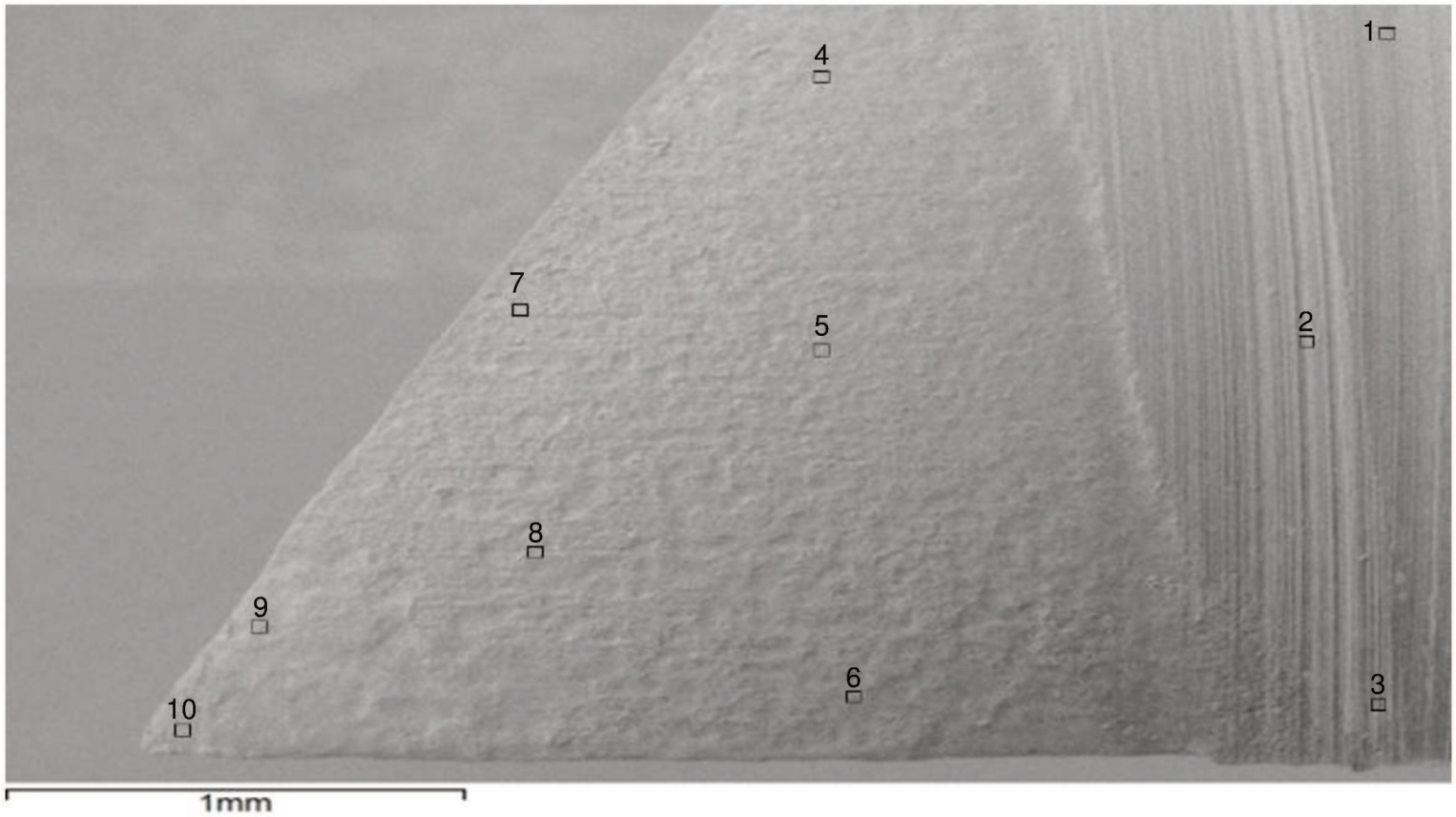


Figura 7- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM03.

Tabela 7 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 7.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	3.782	0.295	1.561	0.000	0.000	0.000	16.402	18.946	0.000	52.649	1.286	0.078	3.397	1.604
Espectro 2	7.868	0.395	6.641	0.113	0.328	0.083	18.725	11.706	1.878	46.149	1.226	0.610	1.904	2.372
Espectro 3	11.691	0.392	5.224	0.386	0.066	0.020	25.088	16.712	2.416	33.628	0.868	0.019	1.380	2.110
Espectro 4	16.415	1.096	1.403	0.064	0.000	0.073	28.793	14.160	0.000	23.223	1.148	0.000	6.432	7.192
Espectro 5	11.613	0.960	0.146	0.025	0.000	0.000	32.642	19.185	2.962	18.290	1.735	0.279	6.751	5.413
Espectro 6	8.001	0.536	6.088	0.106	0.175	0.217	23.172	16.147	3.002	36.210	1.379	0.000	1.973	2.994
Espectro 7	9.075	0.987	0.964	0.253	0.000	0.634	29.024	15.818	4.119	30.952	0.990	0.000	2.639	4.546
Espectro 8	12.898	1.317	1.221	0.000	0.156	0.388	32.314	16.605	4.563	13.096	1.386	0.175	6.409	9.471
Espectro 9	8.780	0.111	9.866	0.245	0.000	0.000	23.115	15.484	0.000	34.802	0.397	0.000	4.283	2.916
Espectro 10	7.144	0.692	53.613	0.623	0.036	0.000	21.724	9.078	2.276	2.555	0.272	0.139	1.847	0.000

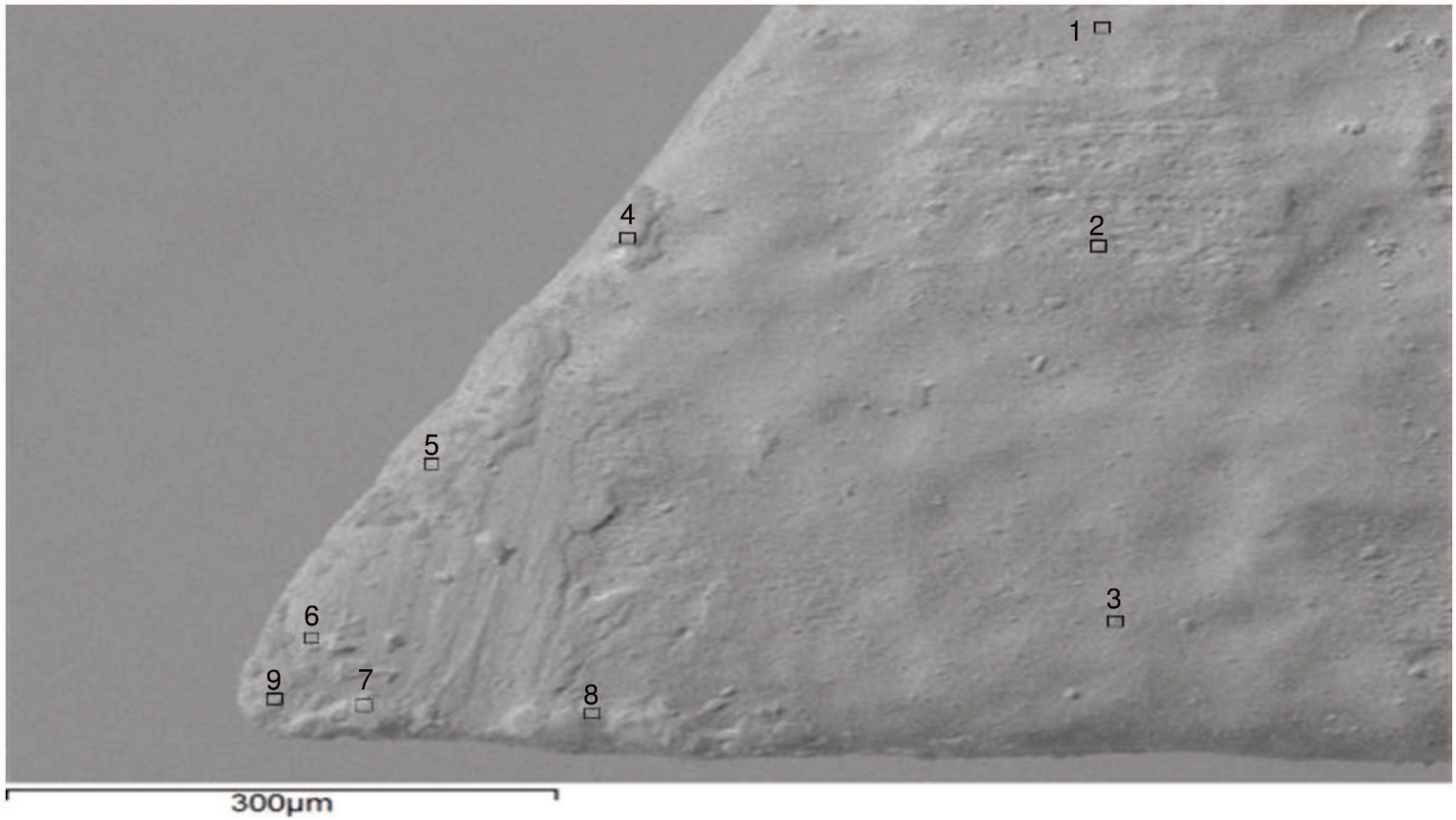


Figura 8- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM03.

Tabela 8 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 8.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	7.408	0.529	2.763	0.097	0.013	0.130	27.427	17.554	5.857	31.129	2.117	0.450	2.049	2.476
Espectro 2	9.185	0.706	5.004	0.081	0.080	0.237	26.764	14.955	4.844	27.916	2.319	0.651	3.575	3.682
Espectro 3	10.047	0.317	18.568	0.181	0.000	0.000	27.187	14.043	5.575	17.273	1.966	0.713	2.328	1.801
Espectro 4	6.193	0.193	28.170	0.499	0.000	0.000	28.705	16.972	7.343	6.821	2.199	0.735	1.968	0.202
Espectro 5	16.930	0.041	12.882	0.190	0.000	0.000	37.919	16.938	7.569	4.654	1.823	0.239	0.619	0.195
Espectro 6	6.168	0.224	40.724	0.510	0.075	0.470	23.613	14.155	6.526	5.228	1.799	0.508	0.000	0.000
Espectro 7	18.925	0.367	18.983	0.784	0.000	0.284	35.167	13.672	4.650	5.496	1.124	0.548	0.000	0.000
Espectro 8	17.158	0.172	8.914	0.127	0.023	0.000	24.299	15.232	0.000	28.858	2.889	0.604	1.676	0.048
Espectro 9	3.250	0.000	46.512	0.568	0.029	0.269	22.050	11.682	7.970	4.492	2.101	0.494	0.000	0.583

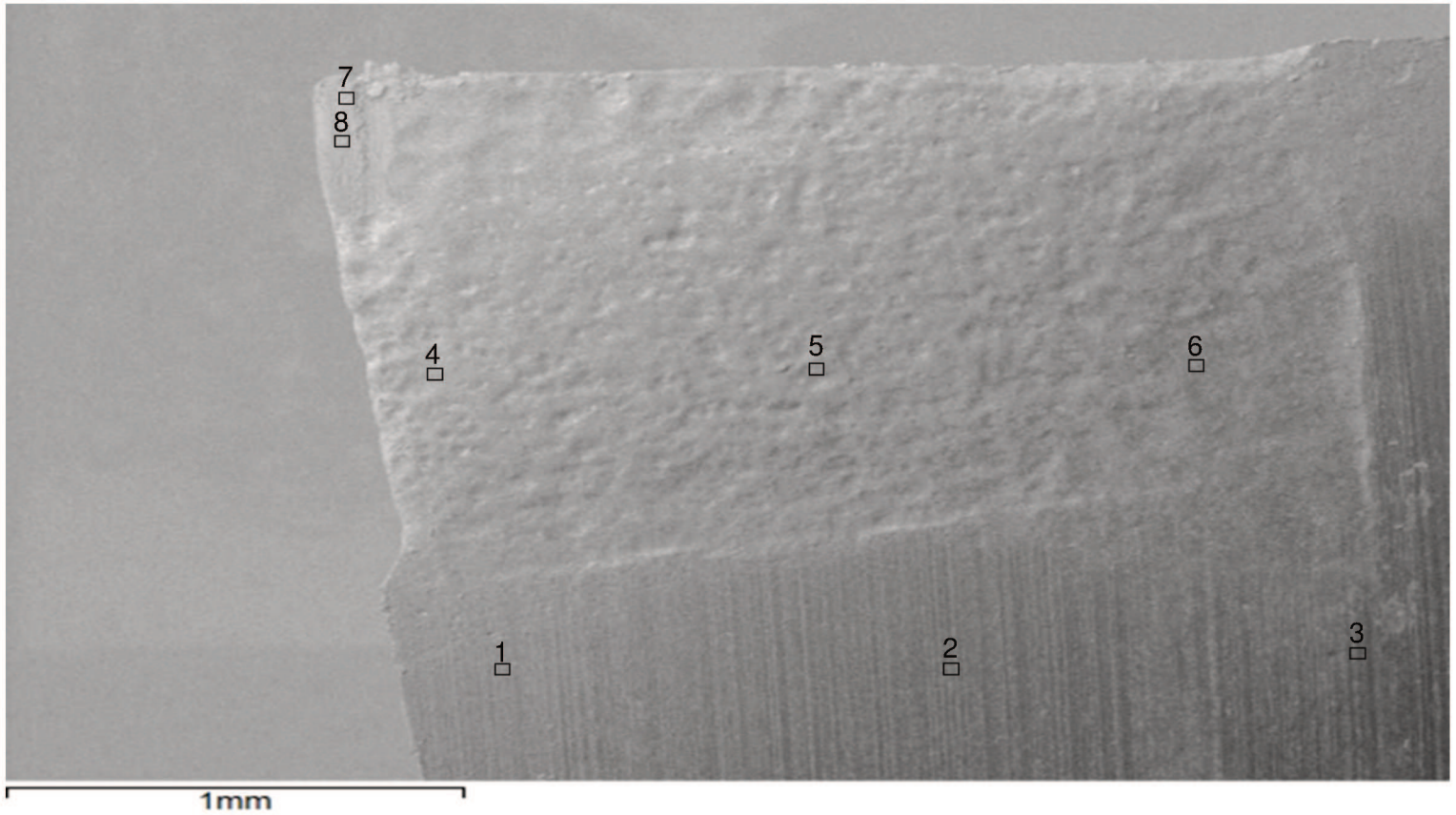


Figura 9- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM04.

Tabela 9 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 9.

FM01-Superfície de folga

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	8.393	0.217	5.679	0.534	0.000	0.000	22.149	15.439	1.044	41.900	0.676	0.000	3.254	0.715
Espectro 2	10.284	0.384	4.419	0.364	0.000	0.000	23.552	12.631	6.686	38.117	1.640	0.393	1.532	0.000
Espectro 3	8.761	0.605	1.015	0.361	0.000	0.426	24.123	14.150	3.334	44.461	0.000	0.000	1.100	1.665
Espectro 4	10.825	0.042	10.073	0.397	0.000	0.053	25.680	15.987	0.258	33.960	0.639	0.000	0.746	1.340
Espectro 5	7.425	0.045	9.037	0.377	0.037	0.000	18.957	13.682	0.000	46.734	1.050	0.000	1.483	1.175
Espectro 6	11.472	0.369	4.243	0.239	0.008	0.095	29.076	17.836	3.316	30.389	1.492	0.000	0.743	0.721
Espectro 7	3.865	0.267	58.007	0.340	0.000	0.000	18.097	8.481	4.412	4.200	1.465	0.119	0.184	0.564
Espectro 8	1.940	0.410	76.547	0.591	0.120	0.081	11.134	3.770	2.243	2.321	0.653	0.000	0.000	0.190

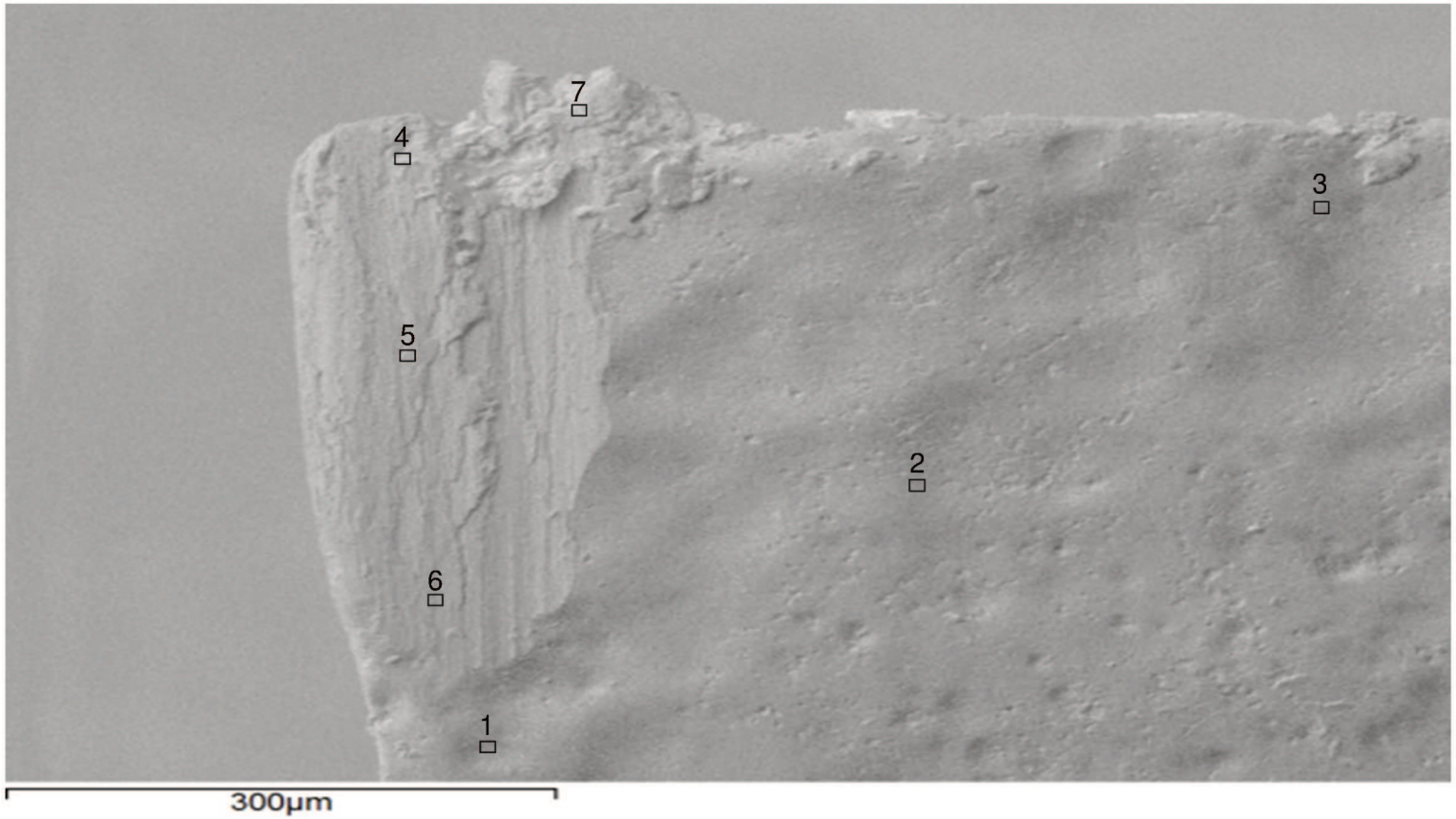


Figura 10 - Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM04.

Tabela 10 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 10.

FM01-Superfície de folga

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	6.195	0.792	1.212	0.404	0.000	0.000	32.672	24.328	10.968	16.988	3.045	0.239	2.182	0.974
Espectro 2	7.824	0.068	20.406	0.794	0.000	0.372	26.509	16.899	5.277	19.278	1.709	0.175	0.000	0.690
Espectro 3	5.206	0.231	6.291	0.756	0.111	0.000	25.434	18.759	6.351	31.850	1.667	0.036	2.085	1.224
Espectro 4	3.247	0.081	51.036	0.576	0.105	0.438	20.487	11.205	6.744	4.022	1.430	0.345	0.000	0.283
Espectro 5	2.109	0.403	54.668	0.456	0.000	0.000	16.691	10.881	6.062	4.270	2.134	0.242	2.084	0.000
Espectro 6	2.022	0.000	49.955	0.774	0.000	0.102	18.669	13.309	7.245	4.884	1.815	0.722	0.170	0.333
Espectro 7	2.971	0.161	40.868	0.403	0.033	0.000	25.132	12.394	9.397	5.310	2.191	0.201	0.293	0.646

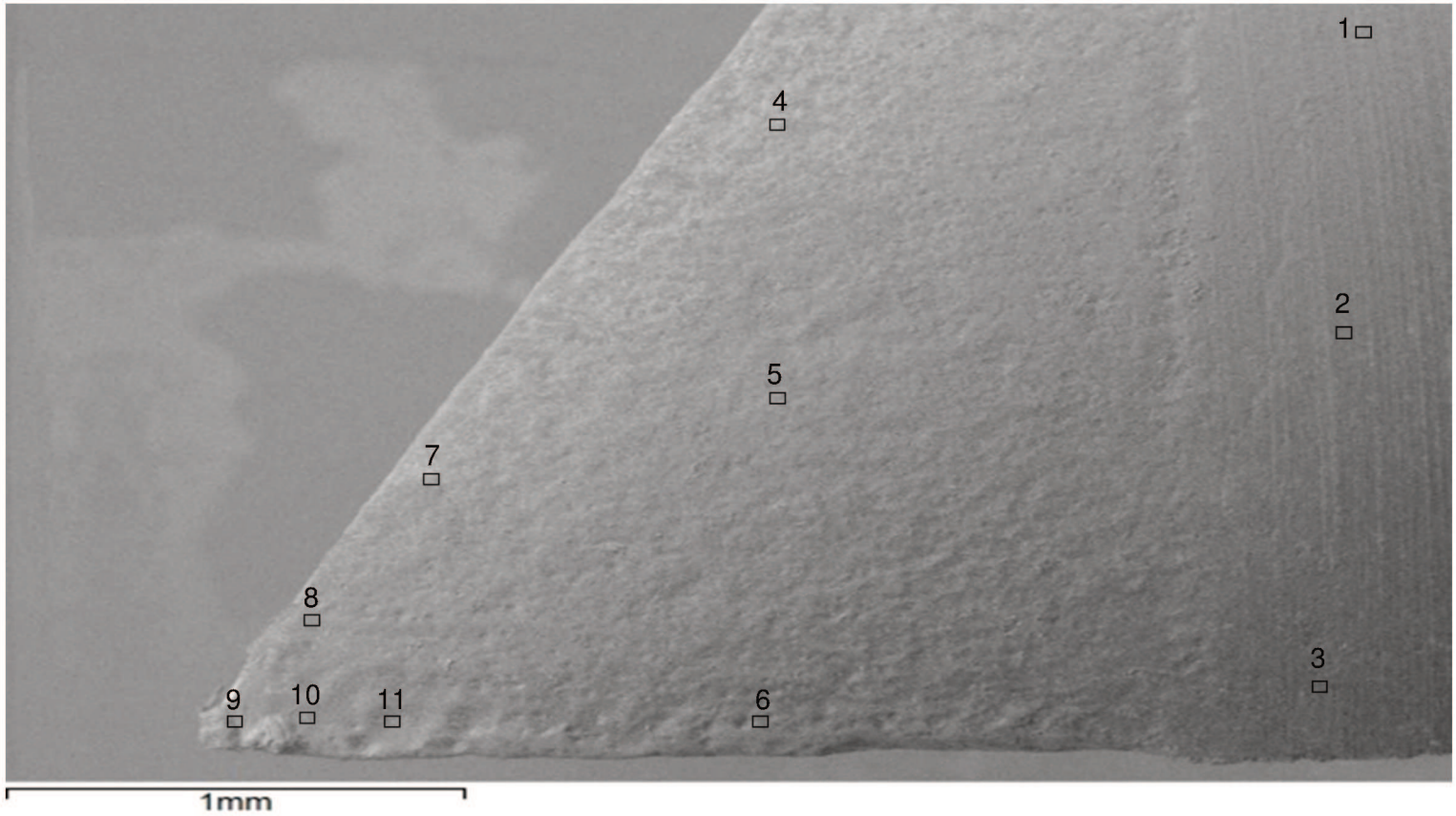


Figura 11- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM04.

Tabela 11 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 11.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta01	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	6.833	0.101	0.263	0.294	0.004	0.000	17.600	18.029	1.633	50.711	1.793	0.030	1.469	1.240
Espectro 2	13.122	0.436	0.317	0.267	0.033	0.000	31.239	17.091	1.876	30.685	1.447	0.152	1.810	1.524
Espectro 3	14.154	0.264	0.190	0.141	0.012	0.000	30.545	17.742	1.956	31.580	1.575	0.457	0.654	0.728
Espectro 4	14.783	0.463	3.487	0.227	0.058	0.000	31.576	19.785	4.206	19.987	1.344	0.367	1.943	1.775
Espectro 5	4.153	0.200	1.033	0.458	0.011	0.000	22.659	17.692	6.953	40.403	1.541	0.474	1.979	2.444
Espectro 6	12.170	0.000	9.501	0.385	0.031	0.000	30.628	13.325	4.498	26.388	1.003	0.015	1.331	0.723
Espectro 7	4.295	0.319	0.945	0.302	0.009	0.000	18.717	16.289	5.485	47.995	1.876	0.000	1.774	1.992
Espectro 8	5.854	0.469	1.254	0.400	0.022	0.000	24.866	17.663	4.915	40.862	1.228	0.513	1.287	0.667
Espectro 9	5.528	0.054	59.645	0.000	0.023	1.855	14.413	9.239	0.000	3.933	1.072	1.140	0.000	3.099
Espectro 10	8.016	0.116	14.770	0.692	0.096	0.000	23.848	10.816	3.387	35.740	1.047	0.026	0.345	1.100
Espectro 11	4.841	0.346	1.164	0.297	0.157	0.156	20.767	14.144	5.992	48.851	0.862	0.000	0.790	1.634

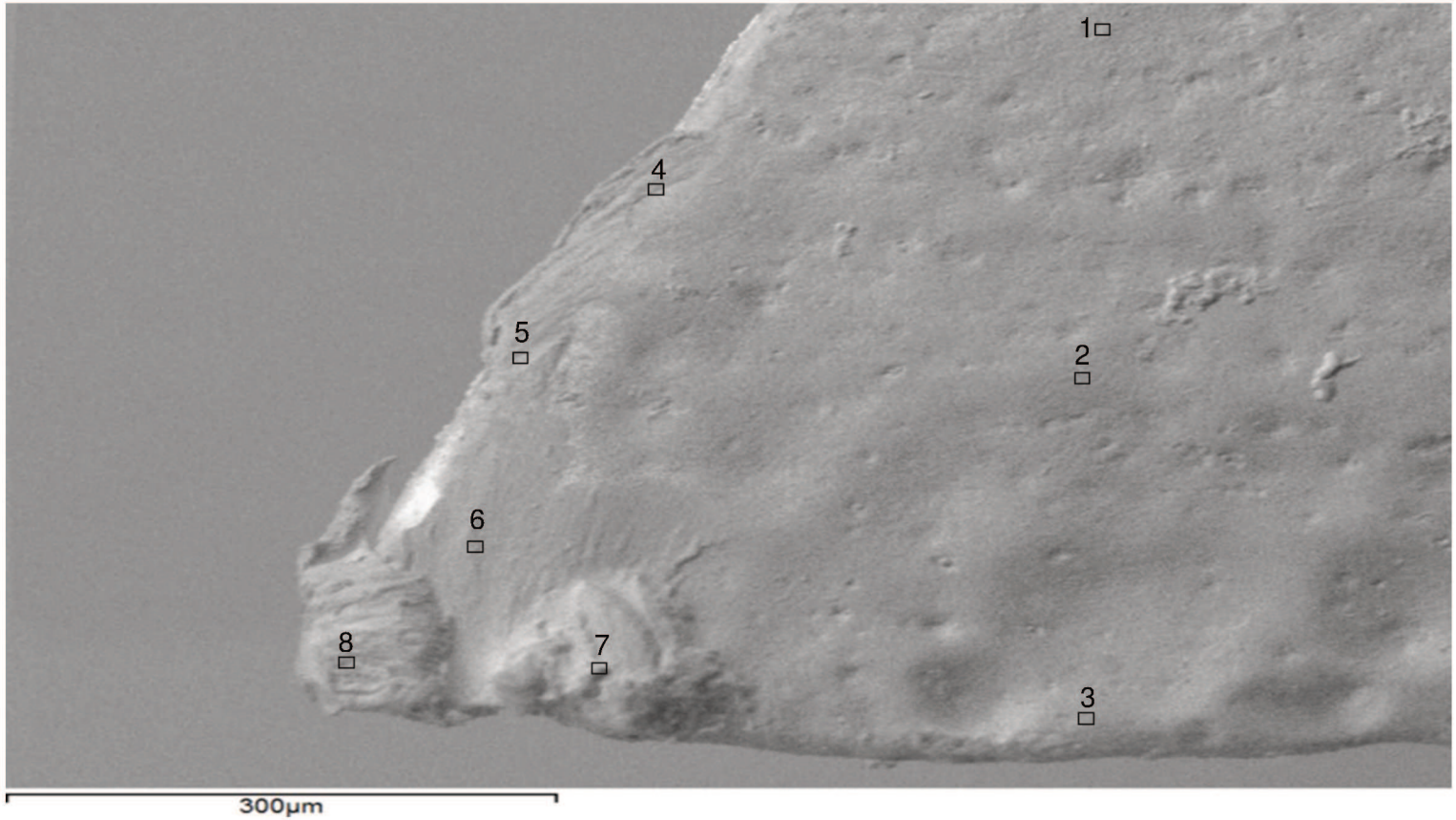


Figura 12- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM04.

Tabela 12 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 12.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
FM04	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	7.718	0.573	0.434	0.291	0.030	0.031	25.592	14.138	3.851	43.742	0.742	0.125	1.175	1.557
Espectro 2	6.148	0.044	7.566	0.312	0.000	0.000	19.929	11.378	4.972	45.355	0.575	0.000	2.208	1.512
Espectro 3	10.174	0.152	9.436	0.406	0.000	0.093	26.781	15.790	1.351	33.861	0.996	0.000	0.138	0.822
Espectro 4	5.813	0.154	56.986	0.457	0.000	0.000	20.539	7.556	4.198	2.874	0.807	0.000	0.489	0.126
Espectro 5	6.375	0.000	51.795	0.431	0.213	0.000	21.213	10.675	3.867	3.445	0.979	0.034	0.000	0.974
Espectro 6	9.025	0.003	51.121	0.443	0.000	0.792	20.803	8.801	4.383	3.086	1.229	0.314	0.000	0.000
Espectro 7	7.050	0.092	25.227	0.485	0.000	0.261	30.858	16.266	10.185	6.197	2.569	0.728	0.000	0.081
Espectro 8	5.951	0.137	62.702	0.000	0.000	0.000	16.857	5.000	2.924	2.084	0.279	0.293	2.958	0.814

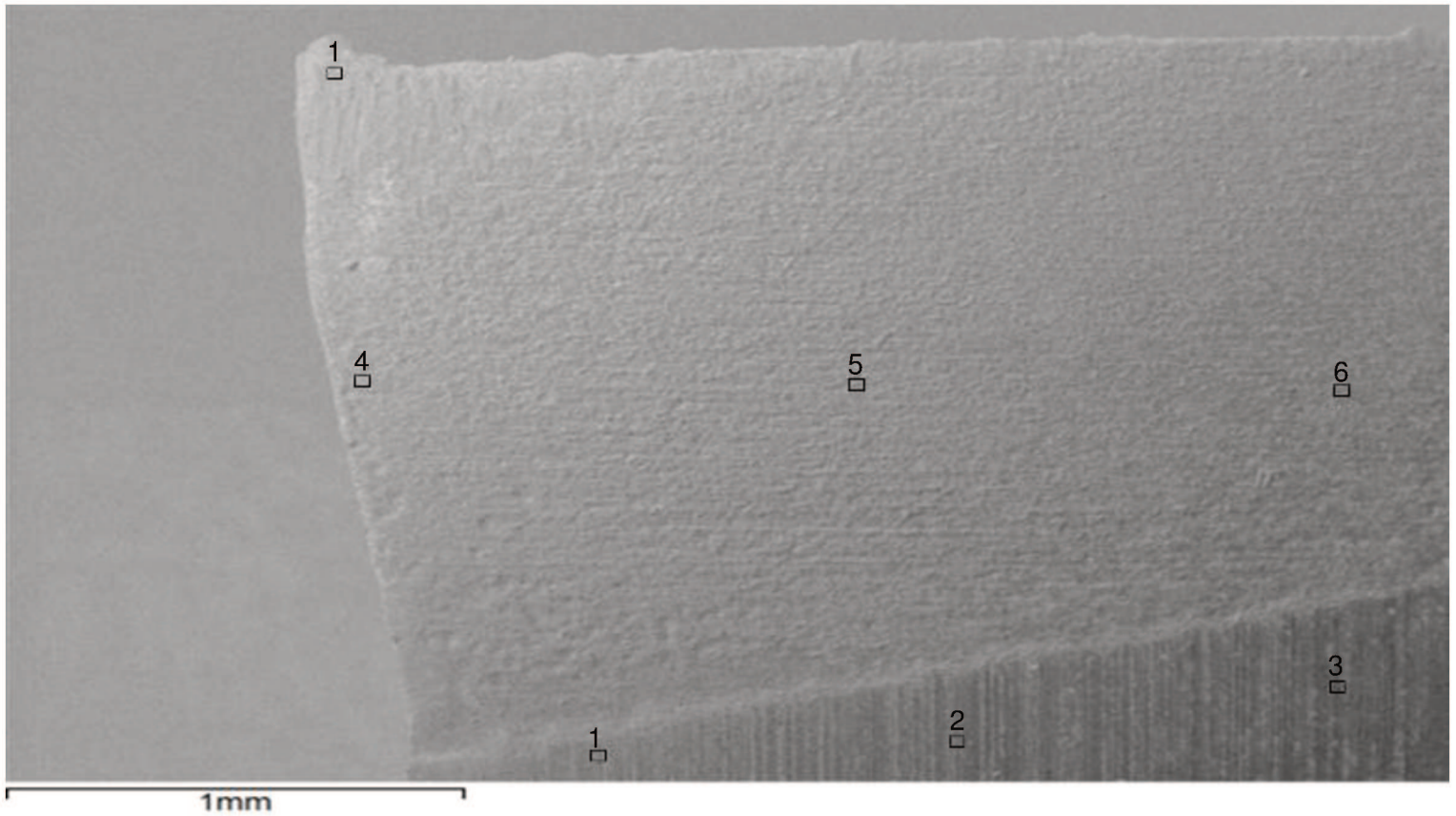


Figura 13- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM05.

Tabela 13 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 13.

FM01-Superfície de folga

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
FM05	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	8.154	0.434	2.284	0.225	0.000	0.000	23.420	13.506	4.478	41.242	1.710	0.290	2.738	1.517
Espectro 2	14.266	0.000	4.113	0.003	0.119	0.488	28.471	13.771	1.184	35.386	0.798	0.000	0.679	0.723
Espectro 3	7.573	0.309	3.041	0.012	0.067	0.000	22.130	11.525	4.418	45.332	0.130	0.000	2.605	2.858
Espectro 4	14.442	0.734	5.265	0.013	0.000	0.000	32.943	16.783	3.070	19.746	0.532	0.000	3.318	3.155
Espectro 5	12.439	1.216	9.838	0.322	0.000	0.000	25.676	15.106	4.292	15.630	3.042	0.727	7.241	4.470
Espectro 6	13.528	0.796	9.157	0.040	0.033	0.167	30.234	15.188	0.000	23.692	0.410	0.000	2.733	4.022
Espectro 7	3.466	0.000	54.037	0.723	0.000	0.305	20.531	10.384	4.744	4.004	1.554	0.137	0.000	0.115
Espectro 8	2.980	0.021	61.780	0.765	0.074	0.000	15.888	8.796	4.551	2.985	1.401	0.760	0.000	0.000

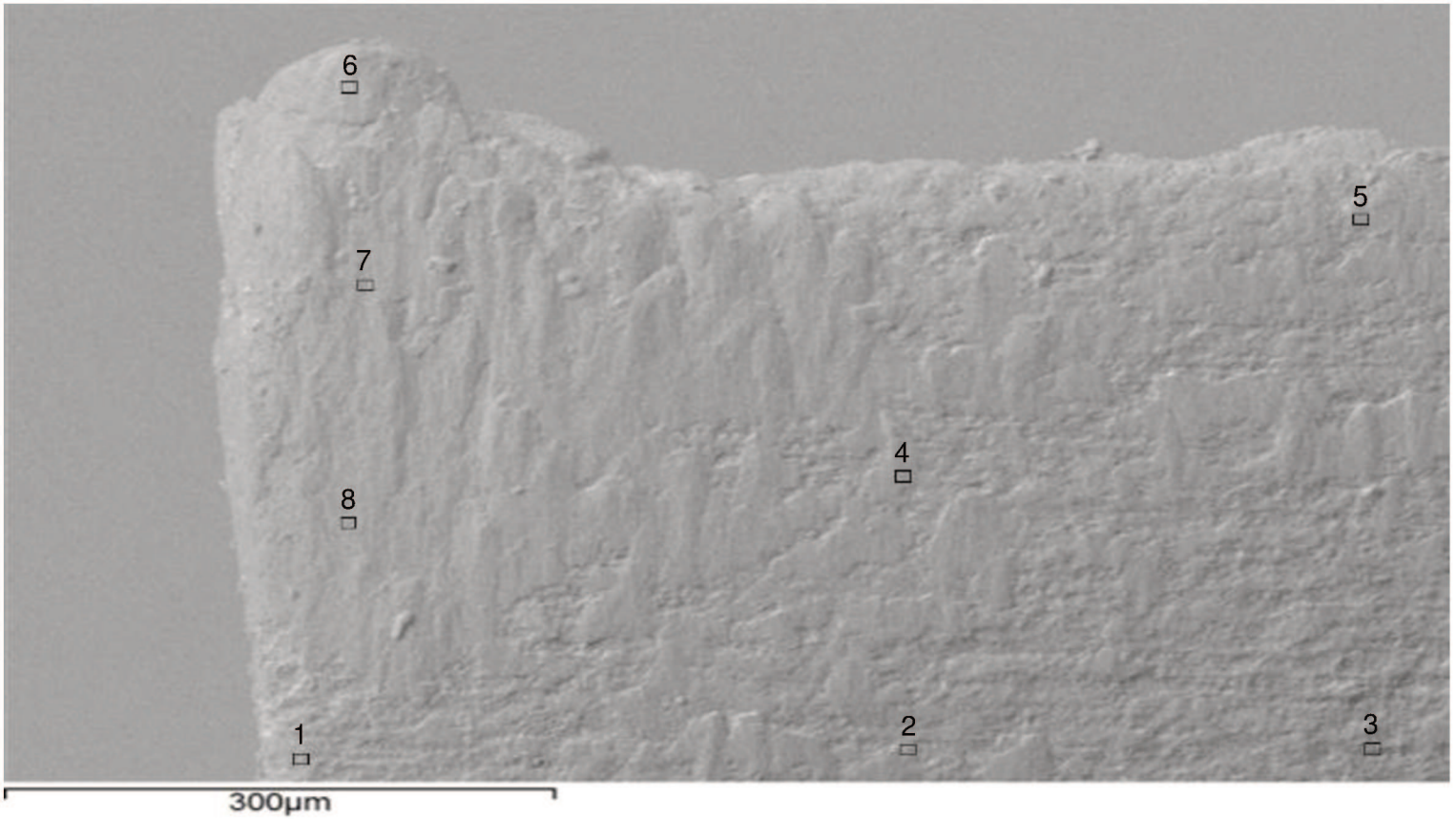


Figura 14- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM05.

Tabela 14 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 14.

FM01-Superfície de folga

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
FM05	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	8.196	0.630	2.160	0.231	0.000	0.000	29.349	17.612	6.486	31.257	1.296	0.521	1.396	0.865
Espectro 2	12.010	0.232	1.039	0.211	0.000	0.000	33.737	17.916	4.028	26.874	1.638	0.395	1.474	0.447
Espectro 3	6.015	0.587	1.483	0.311	0.000	0.000	31.220	22.129	5.697	24.121	1.758	0.000	3.841	2.836
Espectro 4	3.585	0.056	50.982	0.294	0.205	0.315	19.722	10.130	5.982	5.175	1.625	0.856	0.000	1.072
Espectro 5	5.311	0.289	1.291	0.096	0.044	0.180	26.209	16.023	5.946	42.788	1.407	0.034	0.000	0.381
Espectro 6	3.017	0.113	40.542	0.460	0.000	0.000	23.470	13.393	8.953	5.422	2.129	0.743	1.618	0.142
Espectro 7	1.757	0.076	45.516	0.653	0.000	0.000	20.736	14.613	7.761	5.063	2.274	0.361	0.861	0.328
Espectro 8	7.551	0.022	30.622	0.341	0.000	0.000	28.951	14.700	9.237	5.030	2.002	0.595	0.946	0.003

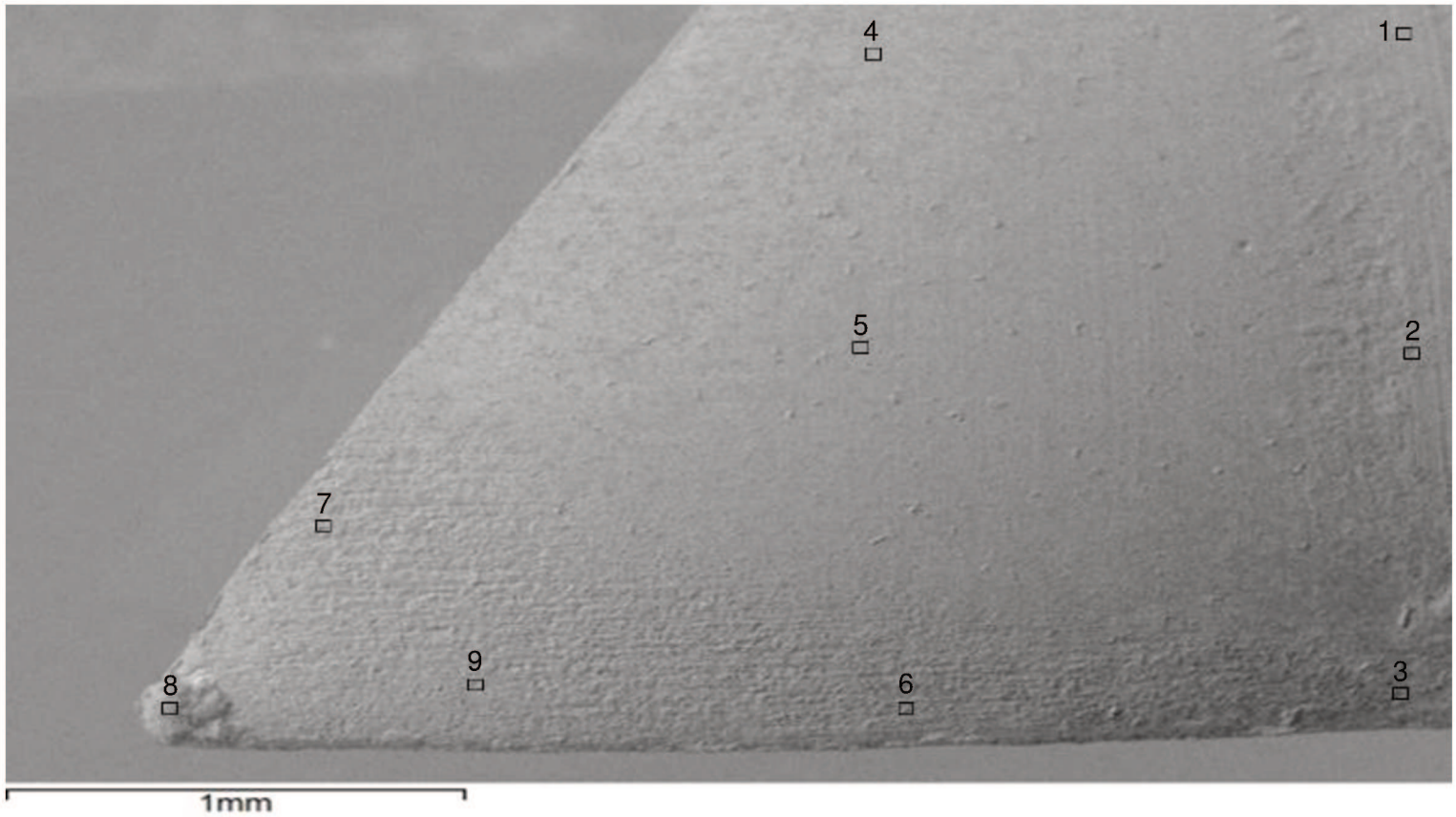


Figura 15- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM05.

Tabela 15 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 15.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
FM05	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	15.884	0.275	0.523	0.000	0.049	0.000	26.171	15.302	0.420	36.432	2.180	0.475	1.655	0.634
Espectro 2	21.579	0.231	4.974	0.000	0.179	0.000	36.237	15.739	0.216	15.381	0.000	0.000	2.502	2.963
Espectro 3	14.635	0.648	3.687	0.081	0.058	0.312	31.072	14.762	2.286	29.975	1.318	0.000	0.081	1.085
Espectro 4	14.787	0.977	4.212	0.003	0.015	0.000	34.088	18.116	3.067	18.264	0.207	0.000	2.784	3.480
Espectro 5	5.950	0.419	2.444	0.099	0.000	0.128	36.616	24.614	11.069	11.631	2.971	0.932	1.576	1.552
Espectro 6	16.648	0.837	2.312	0.126	0.000	0.000	35.057	16.738	4.815	21.561	1.151	0.121	0.419	0.216
Espectro 7	10.571	0.537	6.422	0.011	0.184	0.000	34.262	17.672	4.620	14.050	1.191	0.000	5.163	5.315
Espectro 8	9.163	0.041	81.329	0.000	0.000	0.000	2.273	0.000	1.071	4.766	0.000	0.196	0.848	0.313
Espectro 9	12.517	0.573	2.877	0.018	0.112	0.064	35.005	19.806	6.470	19.303	1.517	0.194	0.685	0.860

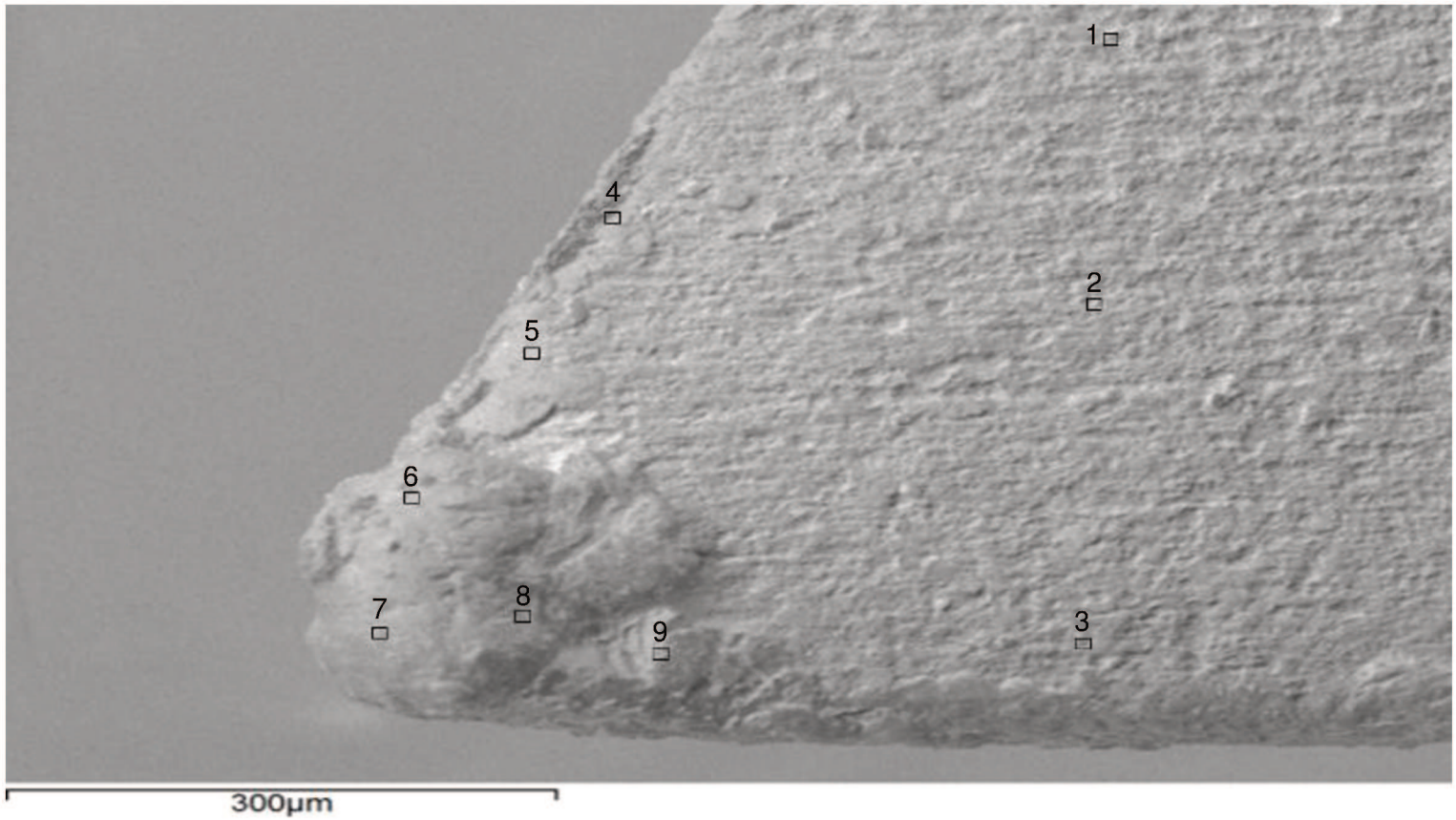


Figura 16- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM05.

Tabela 16 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 16.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
FM05	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	7.938	0.594	3.155	0.060	0.000	0.158	29.925	18.937	7.066	25.051	2.228	0.493	1.851	2.541
Espectro 2	8.072	0.817	3.077	0.060	0.000	0.000	19.339	20.667	0.000	21.639	0.056	0.000	19.106	7.167
Espectro 3	6.492	0.129	5.602	0.410	0.109	0.000	22.166	14.911	2.598	39.966	0.914	0.241	3.528	2.934
Espectro 4	3.766	0.143	64.834	0.000	0.335	0.000	12.957	9.662	0.370	5.021	0.551	0.539	1.150	0.671
Espectro 5	5.832	0.000	25.836	0.366	0.000	0.000	26.705	14.947	6.524	16.182	1.782	0.202	0.949	0.676
Espectro 6	10.936	0.222	18.092	0.000	0.000	0.000	30.595	12.521	3.490	22.578	1.366	0.000	0.200	0.000
Espectro 7	3.536	0.144	49.335	0.637	0.000	0.000	21.199	10.975	6.572	3.760	1.251	0.382	1.950	0.257
Espectro 8	23.820	1.950	50.789	3.619	0.050	0.000	0.000	16.452	0.000	0.463	0.000	0.000	2.855	0.000
Espectro 9	4.704	0.000	6.206	0.000	0.000	0.000	27.668	12.602	10.129	22.484	4.213	4.177	1.559	6.257

Figura 2- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM02.

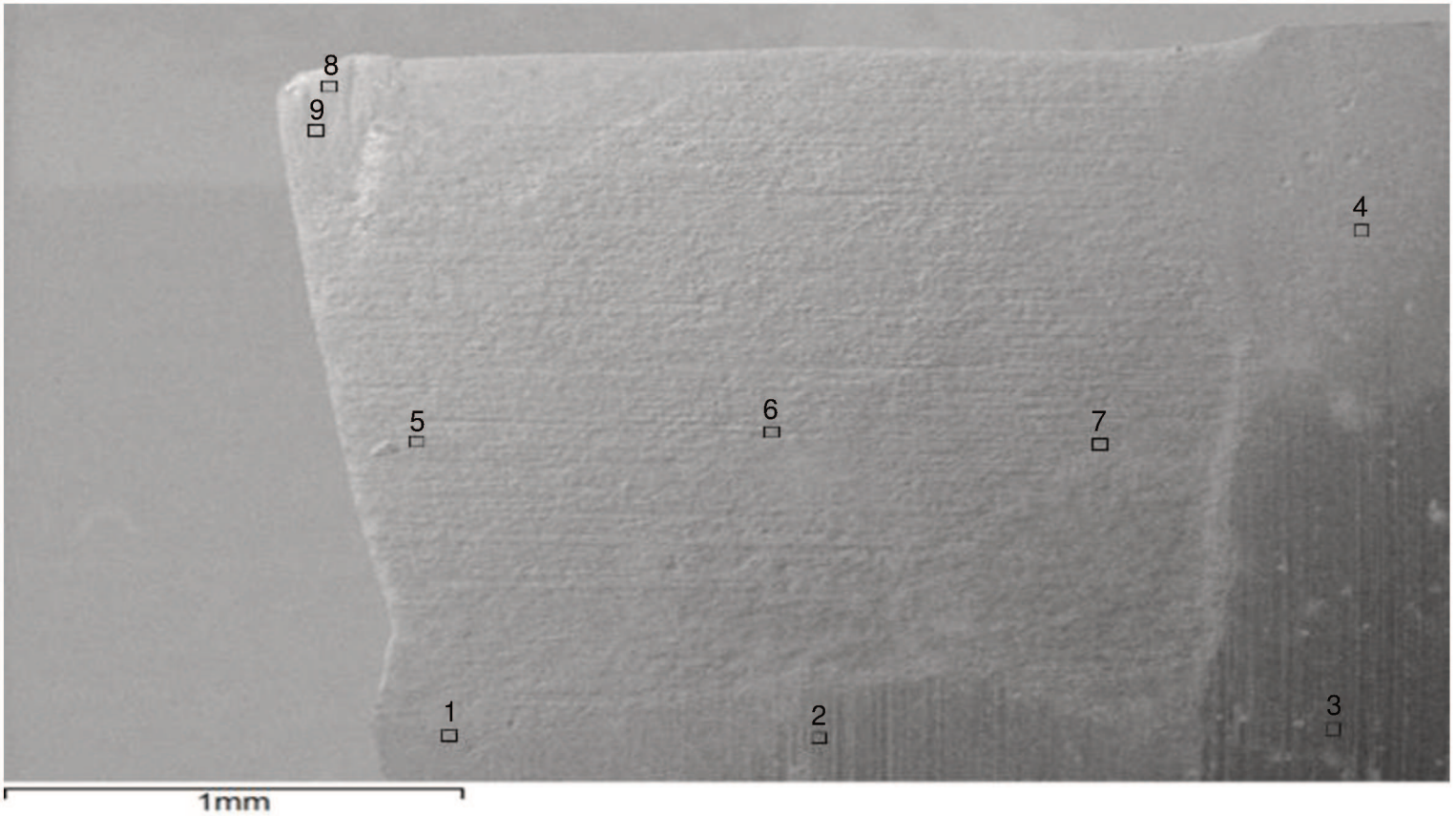


Figura 17- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM06.

Tabela 17 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 17.

FM01-Superfície de folga

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
FM06	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	11.782	0.729	16.839	0.000	0.136	1.229	26.513	15.211	5.137	16.596	1.632	0.650	0.093	3.454
Espectro 2	5.389	0.240	6.697	0.301	0.000	0.758	17.959	13.354	1.200	50.841	0.958	0.000	0.186	2.119
Espectro 3	4.882	0.000	4.976	0.049	0.000	0.000	14.624	11.975	1.028	54.381	0.956	0.350	3.296	3.483
Espectro 4	14.645	0.378	2.123	0.290	0.000	0.000	33.039	15.496	5.533	19.726	1.882	0.511	3.056	3.320
Espectro 5	15.009	0.793	17.621	0.536	0.056	0.034	33.910	15.788	6.515	7.103	1.480	0.276	0.879	0.000
Espectro 6	5.706	0.796	0.945	0.000	0.002	0.000	26.745	16.915	8.595	33.168	1.785	0.712	2.500	2.130
Espectro 7	14.806	0.175	17.069	0.197	0.000	0.122	29.831	12.321	0.190	19.769	0.000	0.000	2.986	2.533
Espectro 8	5.654	0.403	62.203	0.700	0.072	0.696	17.233	5.082	4.057	2.276	1.193	0.430	0.000	0.000
Espectro 9	3.031	0.000	62.253	0.770	0.161	0.212	15.112	9.188	3.679	3.120	1.614	0.384	0.000	0.477

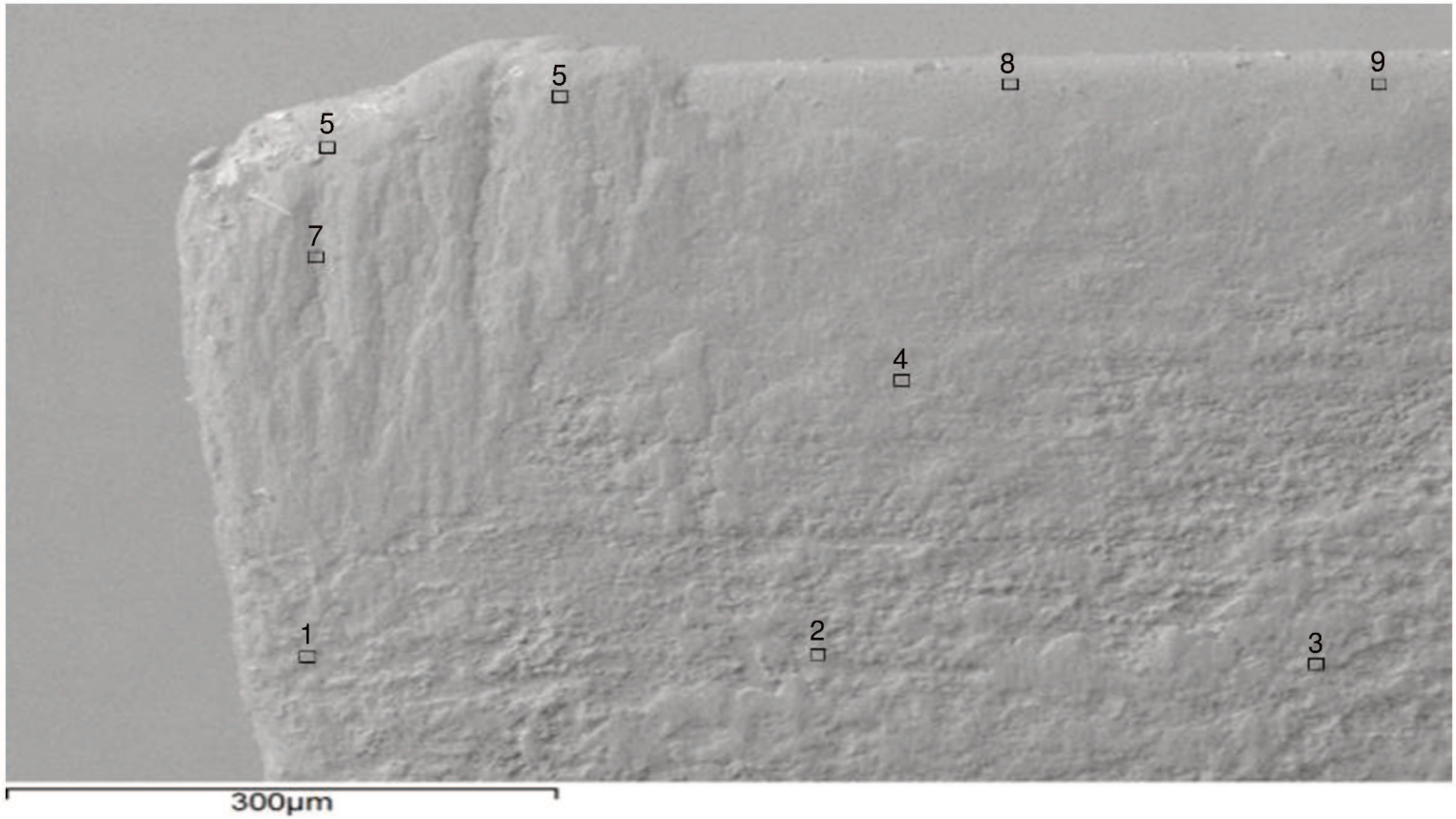


Figura 18- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de folga da FM06.

Tabela 18 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 18.

FM01-Superfície de folga

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
FM06	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	9.095	1.222	0.951	0.516	0.056	0.000	35.846	24.364	9.210	13.493	2.524	0.497	1.105	1.120
Espectro 2	5.761	2.671	6.956	0.594	0.079	1.737	30.527	25.077	9.502	12.231	3.569	1.296	0.000	0.000
Espectro 3	3.385	0.126	42.266	0.672	0.185	0.000	22.815	13.958	7.137	7.108	1.776	0.173	0.000	0.399
Espectro 4	6.000	0.418	31.301	0.766	0.000	0.466	27.158	14.927	8.090	7.887	2.307	0.641	0.000	0.038
Espectro 5	7.072	0.000	36.607	0.595	0.000	0.000	27.280	12.016	8.023	5.150	2.059	0.512	0.637	0.050
Espectro 6	6.004	0.000	33.653	0.430	0.160	0.000	26.332	17.019	7.723	5.354	2.336	0.609	0.146	0.235
Espectro 7	3.669	0.000	40.819	0.558	0.051	0.000	23.998	13.071	7.971	5.657	2.324	0.716	1.165	0.000
Espectro 8	11.039	0.147	20.717	0.413	0.001	0.000	35.756	15.514	7.622	4.765	2.176	0.673	0.820	0.357
Espectro 9	5.371	0.000	28.278	0.394	0.010	0.563	27.039	15.013	9.720	9.760	2.607	0.394	0.000	0.850

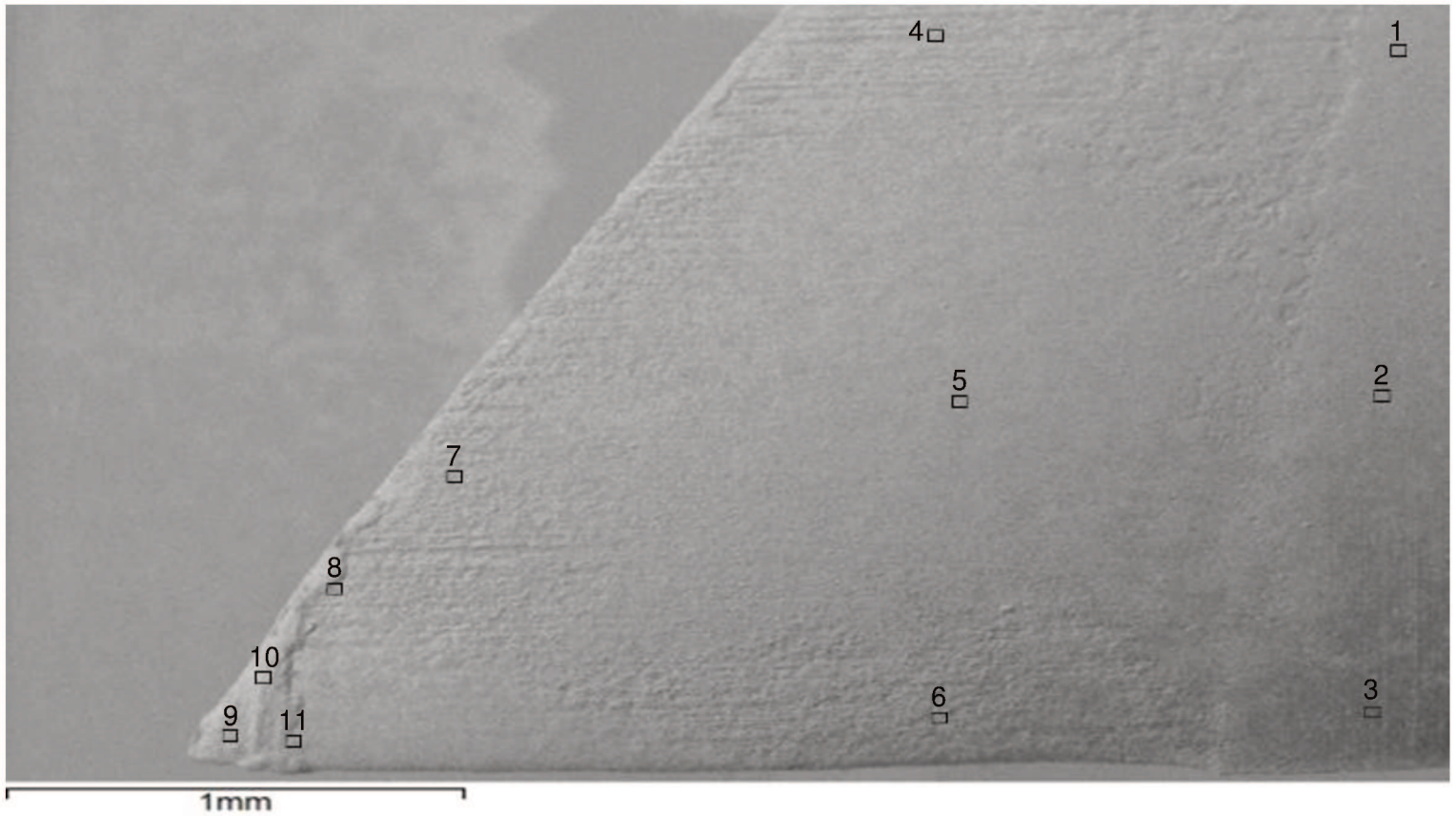


Figura 19 Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM06.

Tabela 19 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 19.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
FM06	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	16.721	0.157	4.146	0.000	0.010	0.397	31.822	13.058	3.085	27.767	2.045	0.192	0.000	0.600
Espectro 2	15.518	0.622	5.874	0.257	0.030	0.568	33.429	15.959	2.541	19.625	1.334	0.123	1.127	2.994
Espectro 3	11.897	0.632	0.572	0.221	0.000	0.833	31.244	17.538	3.519	26.001	1.023	0.000	1.665	4.854
Espectro 4	15.816	0.599	3.525	0.039	0.000	0.000	28.331	14.132	0.766	31.433	1.166	0.000	2.530	1.663
Espectro 5	8.244	0.705	1.446	0.107	0.005	0.000	28.908	17.940	6.770	26.845	2.365	0.964	3.348	2.352
Espectro 6	14.484	1.070	8.062	0.369	0.000	1.492	31.203	13.608	0.816	24.473	1.135	0.439	0.000	2.850
Espectro 7	8.600	0.819	0.607	0.177	0.000	0.134	28.698	19.640	3.821	31.137	0.174	0.000	3.028	3.166
Espectro 8	6.801	0.849	5.656	0.002	0.047	0.000	29.098	19.123	6.841	21.323	2.300	0.507	3.304	4.149
Espectro 9	1.445	0.021	40.376	2.141	0.151	0.004	12.876	8.942	5.157	25.186	1.772	0.076	0.616	1.238
Espectro 10	3.304	0.108	61.030	0.926	0.102	0.000	14.128	7.345	2.895	4.288	1.100	0.532	3.637	0.605
Espectro 11	1.753	0.054	78.285	0.319	0.000	0.000	9.283	5.231	1.888	1.484	0.000	0.000	1.041	0.662

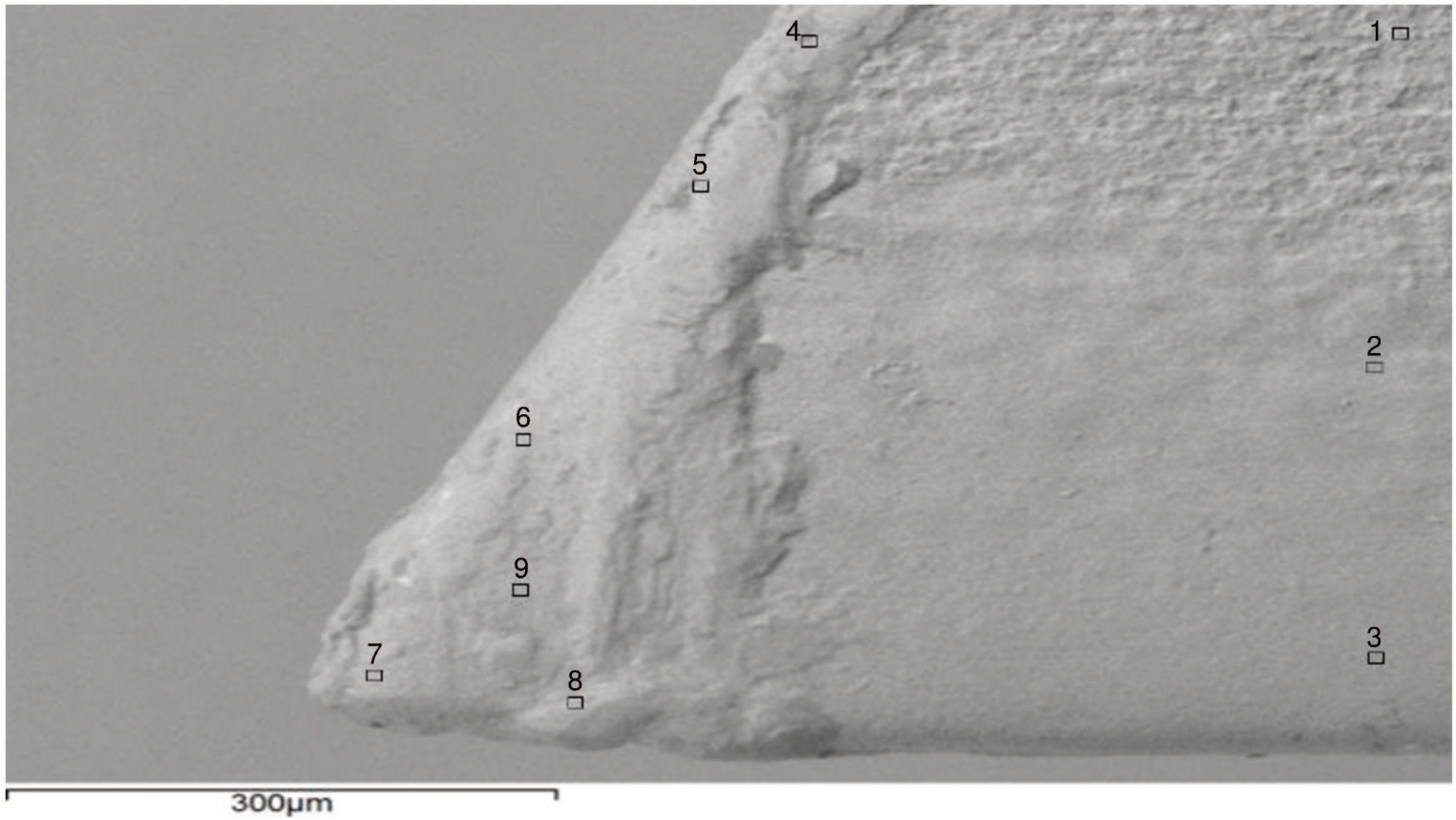


Figura 20- Imagem obtida por meio de MEV-EDS, com modo de visualização TOPO da superfície de saída da FM06.

Tabela 20 - Composição química de todos os espectros apresentados na Fig. 20.

FM01-Superfície de saída

Elementos (%peso)	O	Na	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Ferramenta06	0,000	0,000	0,000	0,300	2,000	6,100	1,850	4,150	0,280	0,000	12,000	0,000	5,200	6,320
Espectro 1	8.482	0.760	3.357	0.310	0.000	0.247	26.876	17.041	4.476	34.341	0.625	0.039	1.759	1.686
Espectro 2	6.692	0.489	4.275	0.197	0.054	0.621	21.052	12.546	3.936	45.088	0.712	0.000	1.665	2.674
Espectro 3	7.948	0.374	22.478	0.423	0.179	0.000	22.801	11.224	5.104	24.281	0.664	0.364	1.770	2.390
Espectro 4	4.003	0.033	55.148	0.842	0.000	0.000	20.688	7.566	5.888	3.419	1.216	0.136	1.062	0.000
Espectro 5	9.547	0.190	30.933	0.488	0.000	0.473	29.591	15.546	6.131	5.052	1.632	0.418	0.000	0.000
Espectro 6	4.803	0.017	51.161	0.862	0.153	0.000	23.460	8.269	5.321	3.172	0.992	0.526	1.265	0.000
Espectro 7	6.753	0.145	40.578	0.523	0.000	0.000	25.848	14.402	4.752	5.182	1.043	0.051	0.628	0.095
Espectro 8	11.555	0.434	16.454	1.229	0.000	0.198	33.023	19.035	7.431	8.004	1.976	0.388	0.104	0.168
Espectro 9	8.259	0.246	39.499	1.224	0.082	0.057	21.388	7.677	5.876	12.035	1.696	1.224	0.000	0.736