

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DE AÇO P20 COM
DIFERENTES TRATAMENTOS DE FERRAMENTAS E CONDIÇÕES DE
LUBRIRREFRIGERANTES**

CHARLES ANTONIO OST

CAXIAS DO SUL

2016

CHARLES ANTONIO OST

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DE AÇO P20 COM
DIFERENTES TRATAMENTOS DE FERRAMENTAS E CONDIÇÕES DE
LUBRIRREFRIGERANTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

CAXIAS DO SUL

2016

O85a Ost, Charles Antonio

Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificação / Charles Antonio Ost. – 2016.

103 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.

1. Usinagem. 2. Preparação de gume. 3. Integridade Superficial. 4. Desgaste. 5. MQL. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

**Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com ferramentas
com diferentes tratamentos e condições de lubrificantes**

Charles Antonio Ost

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 21 de setembro de 2016.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann (orientador)
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini
Universidade de Caxias do Sul

*“O conhecimento científico vai além da visão empírica,
preocupa-se não só com os efeitos,
mas principalmente com as causas
e leis que o motivaram.”*

Nicolau Copérnico

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio que sempre recebo, pelo carinho e pelos ensinamentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, pelas orientações, críticas e pela amizade, mesmo nos momentos de dificuldade que apareceram ao longo desta caminhada. Agradeço também pelos ensinamentos ao longo do tempo que convivência e por me apresentar à pesquisa e usinagem.

Ao técnico Me. Gerson Luiz Nicola pelo auxílio prestado nos ensaios experimentais, pelas sugestões e críticas e também pela amizade.

Aos colegas do Grupo de Usinagem de Caxias do Sul, pela disposição em ajudar, e pela amizade de todos.

À Universidade de Caxias do Sul, pela disponibilização dos laboratórios para execução dos ensaios e análises.

Aos técnicos dos laboratórios da UCS, Gaston Henrique Rossa, Eng. José Adair de Oliveira Giubel e Luiz Antônio Puton, pelo auxílio prestado, seja no acesso aos laboratórios ou mesmo na utilização de equipamentos e preparação de amostras.

Ao técnico Luciano Traiber, pelo auxílio na realização do processo de polimento e seccionamento dos corpos de prova.

Às empresas Seco Tools e Lesi, pela doação de ferramentas. Às empresas Secta Tools e CNCS pelo auxílio no processo de acabamento por arraste e trocas de ferramentas. Também ao Sr. Marcelo Ruziska pelo auxílio em relação à comunicação com as empresas, e ao Sr. Edson Pellin e ao Sr. Bruno Ballardin pelo auxílio prestado em relação às ferramentas.

À empresa Blaser pela doação de fluido MQL para os experimentos realizados.

Ao Centro Universitário de Brusque, e ao professor Denis Boing, pelo auxílio com a medição das ferramentas.

À todos que de alguma maneira ajudaram na realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho estudou o efeito de tratamentos de gume e a interação com a aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL) sobre a integridade superficial da peça e desgaste no fresamento. A necessidade de alta produtividade das indústrias aliada à alta eficiência que estas necessitam impulsionam avanços tecnológicos na área da usinagem. Processos de tratamento de gume vêm para atender estas necessidades, aumentando a durabilidade e confiabilidade das ferramentas. Por outro lado, a necessidade de economia em fluidos de usinagem, sem perder em desempenho impulsiona a utilização de alternativas como o MQL. Tanto o tratamento de gume quanto a utilização de MQL na usinagem acabam impactando no processo. Estes apresentam ligação com mudanças na qualidade superficial e desgaste, como também em aspectos econômicos do processo. Com estes pontos em vista foram realizados ensaios experimentais utilizando fresas tratadas pelo método de acabamento por arraste e polimento com cerdas abrasivas. Os experimentos também avaliaram a aplicação de MQL com e sem aditivos de extrema pressão. Os ensaios consistiram em gerar superfícies, retratando diferentes estágios de vida da ferramenta. Foram realizadas, nas ferramentas, análises da rugosidade, textura e características dimensionais das ferramentas após os tratamentos. A textura e a rugosidade na seça foram analisadas em diferentes estágios da vida da ferramenta. Por fim, deformações plásticas e dureza por micro indentação no corpo de prova foram medidas para um estágio intermediário da vida da ferramenta. Os resultados apontam que os tratamentos resultam em características distintas na ferramenta. Tanto os tratamentos como a aplicação de MQL apresentaram influência significativa sobre a textura, rugosidade e camada afetada, assim como sobre o desgaste. As ferramentas que passaram pelo polimento apresentaram boa estabilidade quanto utilizadas com MQL, alcançando um comprimento usinado até 20% superior em comparação com as ferramentas originais usinando a seco.

Palavras-chave: Preparação de gume, Integridade superficial, Desgaste, MQL.

ABSTRACT

This work studied the effect of edge preparation and its interaction with minimum quantity of lubricant (MQL) application over the surface integrity of the workpiece and wear in milling. The necessity of high productivity of the industry allied with high efficiency that they need drives technological advances in the machining area. Edge preparation processes come to attend those needs, increasing the durability and reliability of the tools. Moreover, the necessity for economy in metalworking fluids, without losing in performance impels the use of alternatives such as MQL. Both the edge preparation and the use of MQL in machining end up impacting the process. These have connection with changes in surface quality and wear, as well as on economic aspects of the process. In regarding of this, experimental tests were conducted by using tools treated with drag finishing and polishing with abrasive brushes. The experiments also evaluated the use of MQL with and without extreme pressure additives. The tests consisted in generating surfaces, picturing different stages of the tools life. Roughness analysis, texture and dimensional measurements of the tools were performed after treatment. Texture and roughness on the workpiece were analyzed at different stages of the tool life. Finally, microhardness and plastic deformation were measured on the workpiece for an intermediate stage of tool life. The results show that the treatments result in different characteristics on the tool. Both treatments as the application of MQL have significant effect on the texture, roughness and affected layer as well as on the wear. The tools that went through polishing presented good stability when used with MQL, reaching a machining length up to 20% higher in comparison with the original tools in dry milling.

Keywords: Edge preparation, Surface integrity, Wear, MQL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Velocidade e Trajetória no fresamento	20
Figura 2 – Geometria de contorno do gume arredondado.....	21
Figura 3 – Formas de gume arredondado.....	22
Figura 4 – Processos de acabamento em ferramentas.....	22
Figura 5 – Aspectos afetados pelo tratamento de gume.....	24
Figura 6 – Cinemática do polimento por cerdas abrasivas.....	26
Figura 7 – Cinemática do processo de acabamento por arraste e máquina.....	27
Figura 8 – Sistemas de MQL interno e externo.....	31
Figura 9 – Representação esquemática do perfil de rugosidade usual.....	34
Figura 10 – Representação dos elementos presentes numa seção de material.....	35
Figura 11 – Exemplo da variação da deformação plástica com o desgaste	35
Figura 12 – Ilustração do desgaste de flanco e exemplo em uma fresa	37
Figura 13 – Comportamento da curva padrão de desgaste.....	38
Figura 14 – Corpos fixados na máquina	41
Figura 15 – Corpos de prova e pontos de medição de rugosidade	42
Figura 16 – Fresa de topo inteiriça de metal duro com canto vivo.....	43
Figura 17 – Processo de polimento.....	44
Figura 18 – Cristais de diamante	49
Figura 19 – Superfície do grão de casca de noz	49
Figura 20 – Vista detalhada da esponja de polimento	50
Figura 21 – Análise por EDS da esponja de polimento.	51
Figura 22 – Medições de diâmetro e ângulo de hélice.....	52
Figura 23 – MEV da região da quina da ferramenta nos diferentes tratamentos	53
Figura 24 – Vista em detalhe da superfície da ferramenta.....	53
Figura 25 – Valores de rugosidade medidos no gume principal	55
Figura 26 – Valores de rugosidade medidos no gume secundário	55
Figura 27 – Valores de raio de gume medidos	56
Figura 28 – Valores do fator de forma K medidos	57
Figura 29 – Textura e perfil de rugosidade da condição OF SECO	59
Figura 30 – Textura e perfil de rugosidade da condição OF MQL1.....	59
Figura 31 – Textura e perfil de rugosidade da condição OF MQL2.....	60

Figura 32 – Valores de R_a e R_z medidos	61
Figura 33 – Exemplo de medição de camada afetada.....	64
Figura 34 – Gráfico da camada afetada Al_x , Al_z e Al_y medidos.....	64
Figura 35 – Perfis de dureza medidos.....	65
Figura 36 – Comportamentos de desgaste das ferramentas OF	67
Figura 37 – Comportamentos de desgaste das ferramentas AA.....	68
Figura 38 – Comportamentos de desgaste das ferramentas POL	68
Figura 39 – Comprimento usinado por condição	69
Figura 40 – Desgaste nas ferramentas.....	70
Figura 41 – EDS da face da ferramenta (OF – MQL2) com adesão	72
Figura 42 – MEV de algumas ferramentas com desgaste	73
Figura 43 – MEV da ferramenta POL - SECO com desgaste	74
Figura 44 - Relatório simplificado do gume principal da ferramenta original (OF)	83
Figura 45 – Relatório simplificado do gume secundário da ferramenta original (OF).....	84
Figura 46 – Relatório simplificado do gume principal da ferramenta com acabamento por arraste (AA).....	85
Figura 47 – Relatório simplificado do gume secundário da ferramenta com acabamento por arraste (AA).....	86
Figura 48 – Relatório simplificado do gume principal da ferramenta com polimento por cerdas abrasivas (POL)	87
Figura 49 – Relatório simplificado do gume principal da ferramenta com polimento por cerdas abrasivas (POL)	88
Figura 50 - Perfil de rugosidade do gume principal da ferramenta OF	89
Figura 51 - Perfil de rugosidade do gume secundário da ferramenta OF	89
Figura 52 - Perfil de rugosidade do gume principal da ferramenta AA.....	89
Figura 53 - Perfil de rugosidade do gume secundário da ferramenta AA.....	89
Figura 54 - Perfil de rugosidade do gume principal da ferramenta POL.....	89
Figura 55 – Perfil de rugosidade do gume secundário da ferramenta POL	90
Figura 56 – Textura e perfil de rugosidade da condição AA SECO.....	91
Figura 57 – Textura e perfil de rugosidade da condição POL SECO.....	91
Figura 58 – Textura e perfil de rugosidade da condição AA MQL1	92
Figura 59 – Textura e perfil de rugosidade da condição POL MQL1	92
Figura 60 – Textura e perfil de rugosidade da condição AA MQL2.....	93
Figura 61 – Textura e perfil de rugosidade da condição POL MQL2	93

Figura 62 – Rugosidade longitudinal R_{max}	94
Figura 63 – Gráfico da rugosidade transversal R_a	95
Figura 64 – Gráfico da rugosidade transversal R_z	96
Figura 65 – Gráfico da rugosidade transversal R_{max}	96
Figura 66 – Curvas de vida para a condição SECO.....	98
Figura 67 – Curvas de vida para a condição MQL1	98
Figura 68 – Curvas de vida para a condição MQL2	99
Figura 69 – Centro de Usinagem utilizado nos ensaios	101
Figura 70 – Equipamentos utilizados para caracterização	102
Figura 71 – Microscópio de foco infinito Alicona	102
Figura 72 – Máquina de medição universal Zoller	103
Figura 73 – Equipamento de MEV – FEG Tescan	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do óleo vegetal como lubrificante	32
Tabela 2 – Sequência das condições testadas.....	40
Tabela 3 – Velocidades, condições e número de ferramentas do pré-teste.....	46
Tabela 4 – Valores de rugosidade medidas nos gumes principal e secundário	54
Tabela 5 – ANOVA dos valores de R_a	63
Tabela 6 – ANOVA dos valores de R_z	63
Tabela 7 – ANOVA da rugosidade longitudinal R_{max}	94
Tabela 8 – ANOVA da rugosidade transversal R_a	97
Tabela 9 – ANOVA da rugosidade transversal R_z	97
Tabela 10 – ANOVA da rugosidade transversal R_{max}	97
Tabela 11 – Composição Química do Material AISI P20.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS

α	nível de significância [%]
α	ângulo de folga [graus]
β	ângulo de cunha [graus]
Δr	distância mínima até o vértice [μm]
φ	ângulo do maior ponto do contorno [graus]
φ	ângulo de direção de avanço
Ω	ângulo do cantilever [graus]
Ω_r	ângulo de desprendimento do cantilever [graus]
Ω_c	ângulo de contato do cantilever [graus]
γ	ângulo de saída [graus]
A_α	flanco da ferramenta
A_γ	face da ferramenta
a_e	profundidade de corte radial [mm]
Al_a	espessura média da camada afetada [μm]
Al_z	espessura média dos cinco maiores valores de camada afetada [μm]
Al_y	máxima espessura da camada afetada [μm]
a_p	profundidade de corte axial [mm]
D_c	diâmetro de corte máximo [mm]
dm_m	diâmetro da haste da ferramenta [mm]
Ecq	desvio de forma de círculo [μm]
f	avanço [mm]
F_{bs}	força cisalhante de escovamento [N]
F_{bn}	força normal de escovamento [N]
f_z	avanço por gume [mm/gume]
L	comprimento do filamento [mm]
l_2	comprimento total da ferramenta [mm]
L_c	comprimento de <i>cut-off</i> [μm]
l_e	comprimento unitário de medição [mm]
l_m	comprimento total de medição [mm]
l_t	comprimento de teste [mm]
l_v	comprimento unitário inicial de medição [mm]

K	fator de forma
pH	potencial hidrogeniônico
r	raio de gume
R_a	desvio médio aritmético de rugosidade [μm]
r_h	raio do cantilever [mm]
R_{HA}	raio do planetário [mm]
R_{max}	profundidade máxima individual de rugosidade [μm]
R_q	desvio médio quadrático de rugosidade [μm]
R_p	altura máxima de rugosidade em relação a média [μm]
R_v	profundidade máxima de rugosidade em relação a média [μm]
r_w	raio da ferramenta [μm]
R_y	profundidade máxima individual de rugosidade [μm]
R_z	média aritmética das rugosidades singulares [μm]
S	superfície da peça
S_γ	comprimento do arredondamento no face da ferramenta [μm]
S_α	comprimento do arredondamento no flanco da ferramenta [μm]
V_B	desgaste de flanco [mm]
$V_{B\text{max}}$	desgaste de flanco máximo [mm]
v_c	velocidade de corte [m/min]
v_e	velocidade de corte efetiva [m/min]
v_f	velocidade de avanço [m/min]
y_b	profundidade de penetração [mm]
W	largura do gume [μm]
Z_n	número de gumes

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>	Instituto Americano de Ferros e Aços
ANOVA	Análise de Variância	
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio	
CBN	Nitreto cúbico de boro	
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>	Instituto Alemão de Normas
EDM	<i>Electric Discharge Machining</i>	Eletro Erosão
EDS	<i>Energy Dispersion Spectroscopy</i>	Espectrometria de energia dispersiva
EP	Extrema Pressão	
FAN	Filamento abrasivo de nylon	
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	Organização Internacional de Padronização
LNTp	Laboratório de novas tecnologias de produção	
MEV	Microscopia eletrônica de varredura	
MQL	Mínima quantidade de lubrificante	
SiC	Carboneto de silício	
PCD	Diamante policristalino	
TiAlN	Nitreto de Alumínio e Titânio	
UCS	Universidade de Caxias do Sul	
UNIFEBE	Centro Universitário de Brusque	

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Objetivo geral	19
1.3	Objetivos específicos.....	19
1.4	Estrutura do trabalho	19
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Princípios do fresamento.....	20
2.2	Geometrias de gume	20
2.3	Processos de tratamento de gume	22
2.3.1	<i>Escovamento com cerdas abrasivas.....</i>	24
2.3.2	<i>Acabamento por arraste</i>	26
2.3.3	<i>Influência do tratamento de gume sobre a integridade.....</i>	28
2.3.4	<i>Influência do tratamento de gume sobre o desgaste</i>	29
2.4	Fluidos e sistemas de MQL	30
2.4.1	<i>Fluidos de base vegetal</i>	32
2.4.2	<i>Aditivos em fluidos de usinagem</i>	32
2.5	Acabamento e integridade.....	33
2.5.1	<i>Rugosidade.....</i>	33
2.5.2	<i>Camada Afetada Plasticamente</i>	34
2.6	Desgaste no fresamento	36
2.6.1	<i>Mecanismos e tipos de desgaste.....</i>	36
2.6.2	<i>Vida da ferramenta.....</i>	38
3.	METODOLOGIA	39
3.1	Planejamento experimental.....	39
3.1.1	<i>Variáveis de entrada</i>	39
3.1.2	<i>Variáveis de Saída.....</i>	40
3.2	Material e Corpo de Prova.....	41
3.3	Ferramentas.....	42
3.3.1	<i>Polimento com cerdas abrasivas</i>	43
3.3.2	<i>Acabamento por arraste</i>	44
3.4	Equipamentos.....	45
3.6	Pré-teste	46
4.	RESULTADOS.....	48
4.1	Caracterização das ferramentas após os tratamentos de gume.....	48
4.1.1	<i>Caracterização da mídia do acabamento por arraste</i>	48

4.1.2	<i>Caracterização da esponja de polimento</i>	50
4.1.3	<i>Caracterização das ferramentas</i>	51
4.1.3.1	<i>Caracterização macrogeométrica</i>	51
4.1.3.2	<i>Caracterização superficial</i>	52
4.1.3.3	<i>Caracterização microgeométrica</i>	56
4.2	Análise da integridade superficial após a usinagem	58
4.2.1	<i>Análise da Textura e Rugosidade</i>	58
4.2.1.1	<i>Textura e perfil de rugosidade</i>	58
4.2.1.2	<i>Medição de rugosidade</i>	61
4.2.2	<i>Análise das deformações plásticas e dureza por micro endentação</i>	63
4.3	Comportamento de desgaste	66
4.3.1	<i>Curvas de desgaste</i>	67
4.3.2	<i>Caracterização dos mecanismos de desgaste</i>	70
5.	CONCLUSÃO	75
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE A – RELATÓRIOS DA MICROSCOPIA DE FOCO INFINITO	83
	APÊNDICE B – PERFIS DE RUGOSIDADE DAS FERRAMENTAS	89
	APÊNDICE C – DEMAIS TEXTURAS E PERFIS DE RUGOSIDADE	91
	APÊNDICE D – DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA TRANSVERSAL	94
	APÊNDICE E – CURVAS DE DESGASTE POR CONDIÇÃO	98
	ANEXO A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL	100
	ANEXO B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	101

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Os processos de usinagem são métodos de fabricação com grande importância na maioria dos segmentos de manufatura atual. A necessidade crescente de otimização, redução de custos e maior produtividade leva a uma busca constante por melhorias na área produtiva. Entretanto, para atingir estas condições, as ferramentas passam cada vez mais a trabalhar em condições severas, o que reduz a sua vida útil.

A busca pela produtividade levou a aplicação de métodos para melhorar os processos de usinagem e a qualidade das peças trabalhadas. Esta necessidade culminou no desenvolvimento de ferramentas cada vez mais modernas e precisas. Originalmente, a fabricação de ferramentas apresenta defeitos típicos na região do gume, como rebarbas, micro trincas e irregularidades. A aplicação de processos de preparação de gume surge para resolver estes problemas, eliminando defeitos e irregularidades, e criando uma geometria mais bem definida (RODRIGUEZ, 2009).

A utilização dos processos de preparação de gume vem mostrando resultados satisfatórios quanto à vida da ferramenta. Entretanto, ainda pouco se sabe sobre os efeitos da preparação de gume sob a integridade da superfície gerada e sua interação com fluidos lubrificantes. Uma integridade superficial desfavorável pode ser resultado de diversos fatores, entre os quais, o desempenho das ferramentas durante os processos. Estes podem afetar a formação da superfície através de maiores severidades térmicas e/ou mecânicas.

A integridade superficial é uma característica inerente ao material que passou por processos de fabricação. A caracterização desta superfície vai desde a parte mais superficial do componente, como a rugosidade e textura, até a camada mais interna do material, que contém muitas vezes efeitos de deformações plásticas, camadas afetadas termicamente, alterações de dureza, tensões residuais, mudanças de fase, entre outros (TURKOVICH e FIELD, 1981).

No presente trabalho foram aplicados tratamentos de gume em fresas inteiriças. Diferentemente dos processos como torneamento e furação, o fresamento é um processo que tem como característica o corte interrompido. Por causa desta condição específica, o contato entre a ferramenta e a peça a ser usinada é de grande importância para as propriedades de desgaste da ferramenta e a qualidade da peça, paralelamente às condições de corte (KLOCKE, 2011). O ensaio de fresamento foi conduzido para compreender os aspectos do tratamento de gume na ferramenta e a sua interação com a aplicação de fluido em névoa. As análises são

realizadas nos materiais que realizam os tratamentos, nas ferramentas tratadas e na peça após a usinagem. É realizada ainda uma análise do desempenho e do desgaste das ferramentas. A técnica de aplicação de fluido utilizada é conhecida como mínimas quantidades de lubrificante (MQL). Esta condição de aplicação de fluidos é mais uma variável a ser controlada, e as estratégias e parâmetros utilizados devem ser adequados (NOUARI et al., 2005).

1.2 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi compreender e avaliar os efeitos dos tratamentos de gume juntamente com as condições à seco e com aplicação de MQL sobre a qualidade superficial da superfície usinada e desgaste da ferramenta no processo de fresamento de topo.

1.3 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos foram alcançados:

- a) Caracterizar a ferramenta após a aplicação de tratamentos de gume: acabamento por arraste e polimento com cerdas abrasivas.
- b) Analisar textura e rugosidade no início e fim da vida da ferramenta.
- c) Avaliar a influência dos acabamentos das ferramentas sobre a integridade superficial.
- d) Avaliar a influência da condição à seco, e aplicação de MQL de base vegetal com e sem aditivo, na integridade superficial.
- e) Avaliar o desempenho com base no desgaste das ferramentas tratadas, sob as condições de aplicação de fluido.

1.4 Estrutura do trabalho

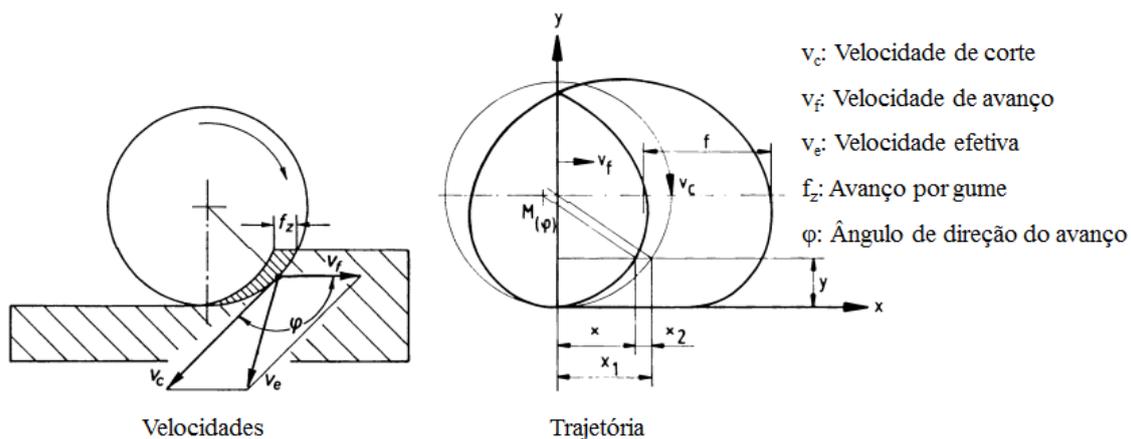
De maneira a atender os objetivos propostos, o trabalho foi organizado inicialmente com a fundamentação teórica necessária aos objetivos (capítulo 2). A metodologia para alcançar os objetivos (capítulo 3) traz os materiais e os métodos aplicados na experimentação. O capítulo 4 traz os resultados experimentais assim como a discussão e confrontação com a literatura. O capítulo 5 expõe as conclusões, baseado nos objetivos inicialmente propostos e o capítulo 6 traz sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Princípios do fresamento

Fresamento é um método de produção por usinagem com um movimento de corte circular, usualmente com uma ferramenta de múltiplos gumes produzindo uma série de cavacos em uma revolução. É um método para produzir superfícies arbitrárias, dando forma e dimensão desejadas. A direção de corte é perpendicular, ou em algumas vezes transversal ao eixo de giro da ferramenta (KLOCKE, 2011; KALPAKJIAN et al., 2009; DINIZ et al., 1999). Por caracterizar um corte interrompido, produz solicitações térmicas e mecânicas alternantes. O processo deve ser desenvolvido de modo a suportar a grande variação de cargas estáticas e dinâmicas (PAUCKSH et al., 2008). A figura 1 exemplifica as direções de velocidade de corte do fresamento sua trajetória cíclica.

Figura 1 – Velocidade e Trajetória no fresamento



Fonte: Adaptado de Paucksh et al. 2008

A operação de fresamento com ferramenta de topo reto, operação abordada no presente trabalho, geralmente é realizada com ferramentas de diâmetro pequeno, com gumes em sua face e periferia. Tem por característica ser uma operação versátil, podendo realizar entalhes, cavidades e perfis (BRALLA, 2007)

2.2 Geometrias de gume

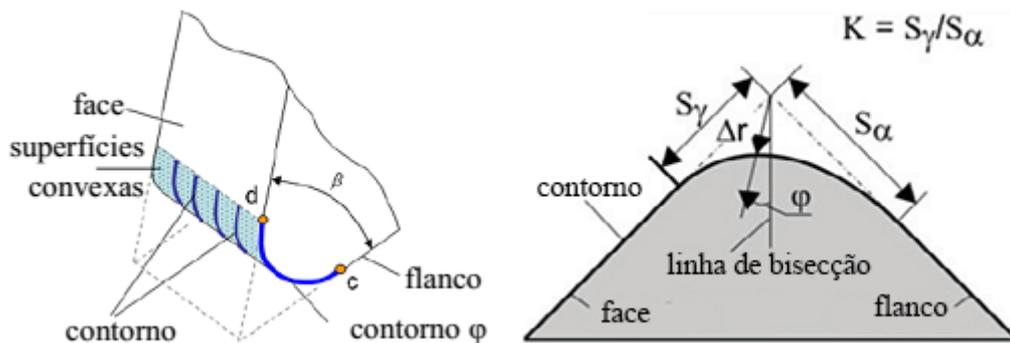
A geometria de uma ferramenta tem um efeito significativo nos parâmetros de entrada e saída de um processo de usinagem (SAMBHAV et al., 2012). Segundo Rodriguez (2009) e

Rech (2006), a geometria de uma ferramenta pode ser dividida em: macro, meso e microgeometria.

A macrogeometria define ângulos de corte, raios de quina, quebra-cavacos e outras superfícies funcionais. Na mesogeometria são considerados os contornos, correspondentes à superfície convexa do gume gerada por processos de tratamento de gumes. E as microgeometrias incluem a microtopografia do gume e superfícies (RODRIGUEZ, 2009; RECH, 2006).

Entre os parâmetros de caracterização de gume se destaca o fator de forma, representado pela letra K. Juntamente com o valor do raio de gume, o fator de forma determina a orientação do gume (AURICH e EFFGEN, 2015). O fator de forma, que faz parte da mesogeometria, é resultante da divisão entre os segmentos de gume S_γ e S_α (DENKENA et al., 2012). A representação do contorno de gume e fator de forma são trazidos na figura 2.

Figura 2 – Geometria de contorno do gume arredondado

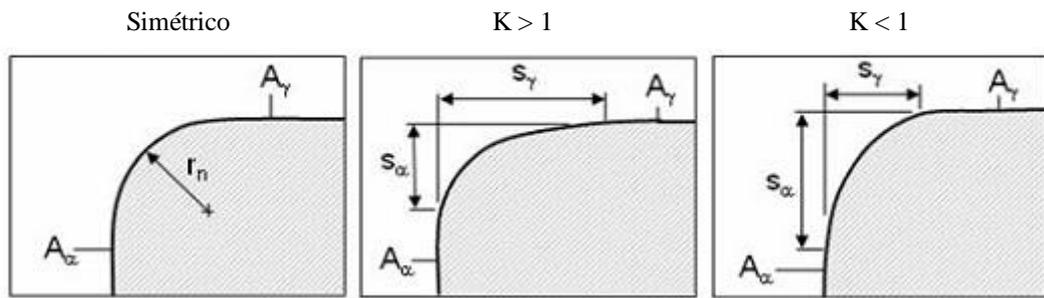


Fonte: Adaptado de Rodriguez 2009, Denkena et al. 2012 e Wyen et al. 2012

As diferentes formas de gume arredondado são mostradas na figura 3. Tratamento de gumes age na geometria do gume e podem modificar a micro topografia, e até mesmo alterar a rugosidade e textura das superfícies da ferramenta (face e flanco) na cunha de corte (RODRIGUEZ, 2009; RECH, 2006).

O resultado alcançado com o tratamento tem influência sobre o desempenho do processo. Em uma operação de furação por exemplo, manipulando o arredondamento para atingir um ângulo de saída mais negativo para a face pode dar um ganho da ordem de 30% na vida da ferramenta. Já em uma operação de torneamento, um arredondamento menor e simétrico costuma produzir melhores resultados (PAUCKSH et al., 2008).

Figura 3 – Formas de gume arredondado

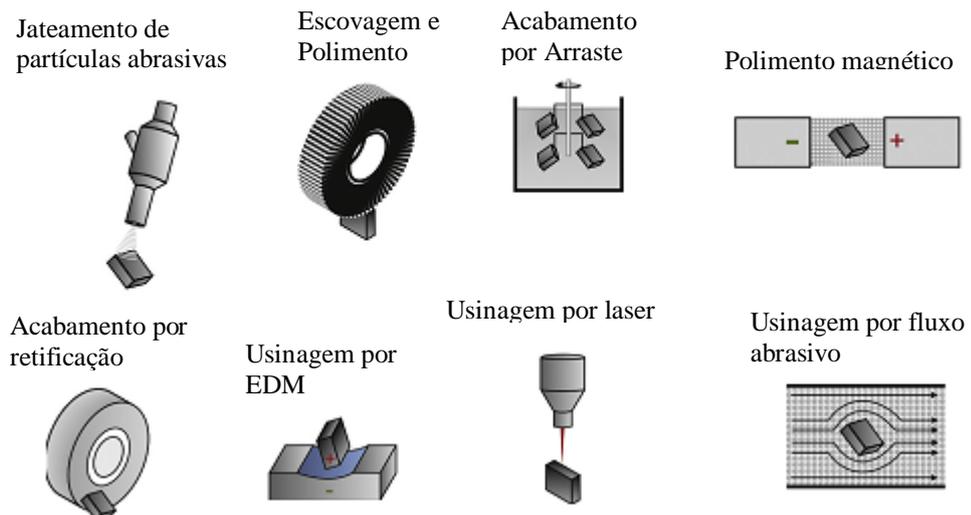


Fonte: Adaptado de Tikal, 2009

2.3 Processos de tratamento de gume

A forma do gume e sua condição são de suma importância nas operações de usinagem. Durante o processo de corte, o impacto das altas temperaturas e cargas mecânicas envolvidas acabam resultando no desgaste da ferramenta. Desta forma, a qualidade da superfície usinada é comprovadamente afetada pela geometria do gume da ferramenta (DENKENA et al., 2012). A alta demanda por produtividade e confiabilidade das indústrias acaba levando aos processos de tratamento de gume, onde alguns dos mais utilizados estão representados na figura 4 (DENKENA e BIERMANN, 2014).

Figura 4 – Processos de acabamento em ferramentas



Fonte: Adaptado de Denkena e Biermann, 2014

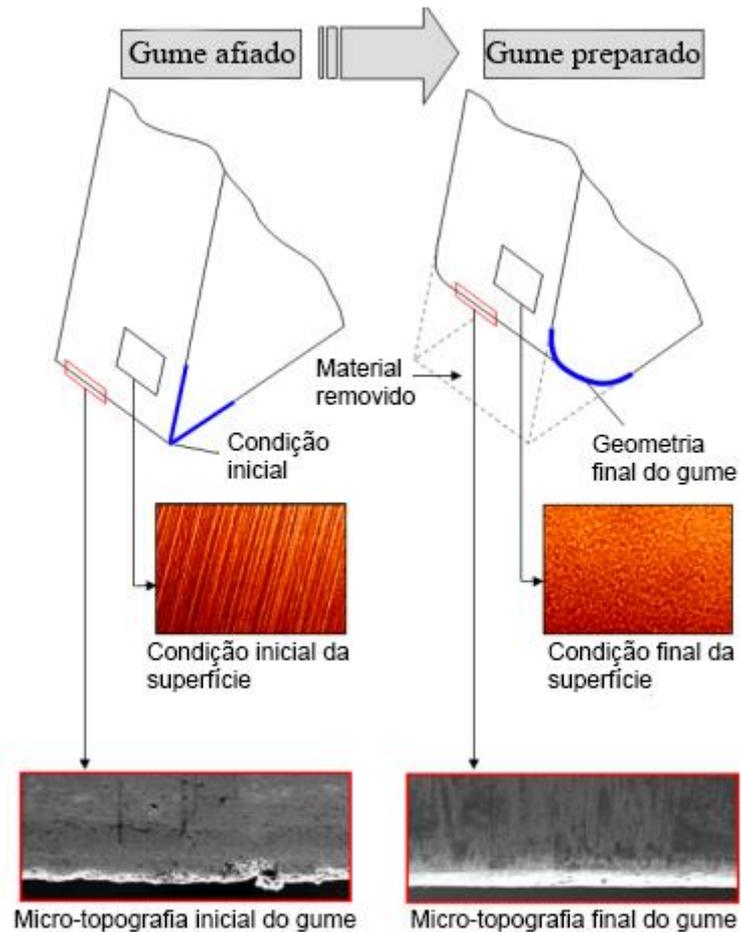
O objetivo do tratamento ou preparação de gume é remover material sistematicamente, podendo agir diretamente na geração da geometria do gume. O tratamento pode modificar a micro topografia do gume, alterando a rugosidade e textura das superfícies da ferramenta nas proximidades do gume (RODRIGUEZ, 2009). Em consequência, o tratamento acaba eliminando defeitos e reforçando o gume, que fica com uma forma mais definida. (RODRIGUEZ, 2009; BIERMANN e TERWEY, 2008; BORDIN, 2013). A figura 5 traz as regiões modificadas pelos tratamentos.

Os gumes podem ser classificados conforme seu raio. São basicamente três grupos, e cada um deles é ligado a um processo industrial. Primeiramente, com raios na faixa de 5 μm , estão as ferramentas afiadas por processo de retífica sem tratamento. Em seguida com raio médio, de 5 a 20 μm , ferramentas tratadas com jatos abrasivos ou acabamento por arraste. Por fim, com raios maiores acima de 20 μm , as ferramentas passam por processos como escovamento (PAUCKSH, 2008; SOMMER, 2013).

Os efeitos do tratamento de gume podem influenciar de diversas maneiras os resultados encontrados na superfície da peça. Diversos autores estudaram os efeitos das alterações da geometria do gume sobre a superfície (BIERMANN e TERWEY, 2008; RODRIGUEZ, 2009; PRIARONE et al 2012; YAMAGUCHI et al 2012; ZEILMANN et al 2012; DENKENA et al, 2012; DENKENA e BIERMANN 2014; BOUZAKIS et al 2014; FULEMOVÁ e REHOR, 2015).

No presente estudo foram escolhidos os tratamentos por arraste e polimento com cerdas abrasivas, pois são tratamentos de simples aplicação, com investimento relativamente baixo e também por sua disponibilidade para realização dos testes.

Figura 5 – Aspectos afetados pelo tratamento de gume



Fonte: Adaptado de Rodriguez, 2009

2.3.1 Escovamento com cerdas abrasivas

Processo de escovamento com filamentos de nylon abrasivos (FAN), é utilizado em aplicações envolvendo requisitos específicos de raios de gumes, e aprimoramento do acabamento superficial. Os FAN não operam como discos de rebolo ou como produtos abrasivos revestidos. Durante o uso, novos grãos abrasivos são constantemente expostos à medida que o nylon se desgasta contra a superfície. Isto auxilia em uma eficiente escovação através da vida da escova. Escovas de FAN removem somente pequenas parcelas de material, e melhoram o acabamento superficial (RODRIGUEZ, 2009; OVERHOLSER et al., 2003).

Este método pode produzir micro geometrias com raios definidos de 0,005 a 0,15 mm. Ao mesmo tempo ainda pode reduzir a rugosidade e melhorar o escoamento de cavacos durante o uso da ferramenta. O método é compatível com todos os tamanhos e séries de ferramentas e

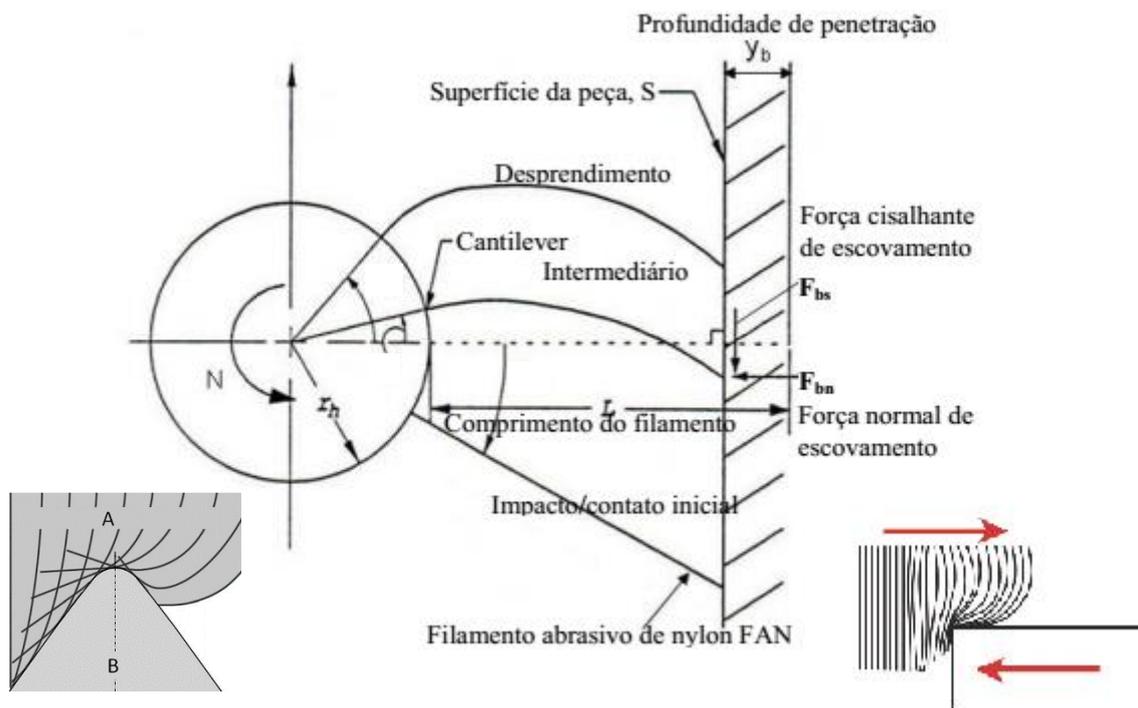
é utilizado por fabricantes de ferramentas do mundo inteiro. Mesmo o material tendo uma geometria arredondada, quadrada, triangular ou ondulada, não afetará o resultado final se aplicada pelo tempo necessário. No entanto, um arredondamento regular e reproduzível é apenas possível com uma tecnologia bem definida (TIKAL, 2009).

Entretanto, pouco se sabe sobre os mecanismos envolvidos durante a remoção de material por esse processo, devido à grande dificuldade de modelagem da complexa interação que ocorre na interface do filamento/peça (RODRIGUEZ, 2009; OVERHOLSER et al., 2003; BASSETT et al., 2012). Apesar de ser um processo de alta aplicabilidade, é necessário observar alguns pontos. Um entendimento do desgaste dos filamentos é necessário para aplicação deste tratamento em larga escala. O controle inadequado pode comprometer a reprodutibilidade e as tolerâncias do gume (PAUCKSH, 2008).

O contato entre o filamento e a superfície plana, representado na figura 6, é realizado de modo ortogonal (orientação perpendicular), em três diferentes posições: local inicial, intermediário e de desprendimento. A força total de usinagem exercida pela ponta do filamento na superfície da peça pode ser decomposta em suas componentes: normal (F_n) e cisalhante (F_s) (OVERHOLSER et al., 2003). O contato com formas geométricas com a forma de gume também é exemplificado, à esquerda onde A representa as cerdas e B o gume da ferramenta, mostrando como se dá a deformação das cerdas. À direita pode se observar a orientação do movimento entre as cerdas e a peça a ser polida.

Em conjunto com a utilização de filamentos de nylon, grãos abrasivos comumente utilizados são o carboneto de silício (SiC) e óxido de alumínio (Al_2O_3). Outras alternativas são o CBN (nitreto cúbico de boro) e PCD (diamante policristalino) (RODRIGUEZ, 2009). O processo aplicado nos ensaios experimentais é uma variação do escovamento com cerdas abrasivas, e será tratado como polimento com cerdas abrasivas. Esta variação tem por objetivo agir na superfície de modo a produzir superfícies homogêneas e diminuir a presença de imperfeições.

Figura 6 – Cinemática do polimento por cerdas abrasivas



Fonte: Adaptado de Bordin, 2013 e Tikal, 2009

2.3.2 Acabamento por arraste

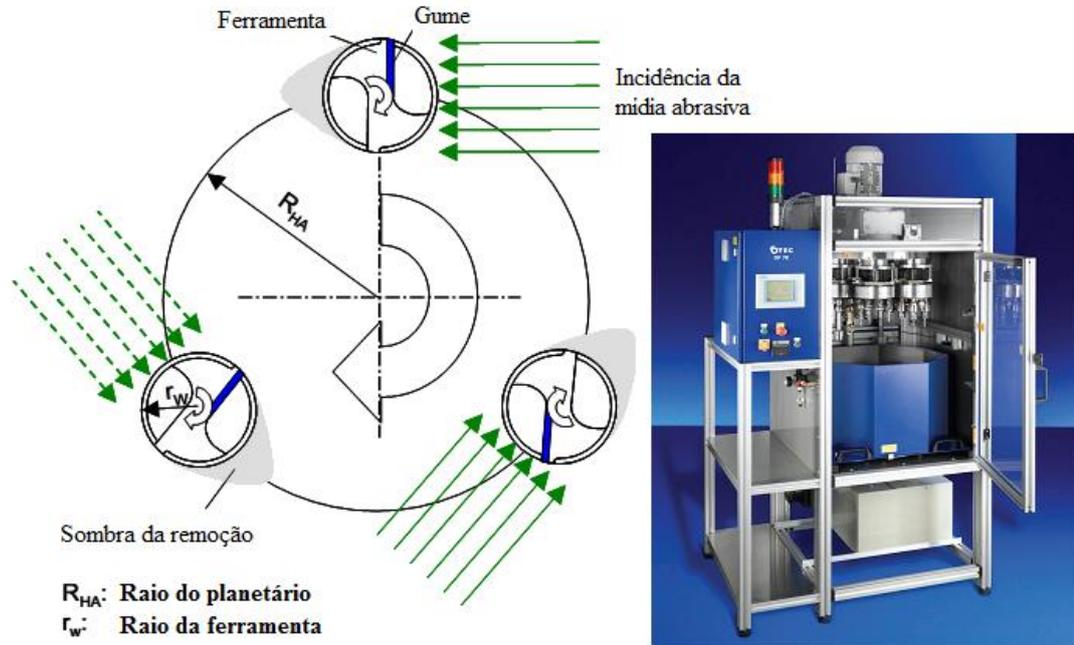
O processo de acabamento por arraste é cada vez mais utilizado na indústria de manufatura. Suas aplicações vão de polir uma junta de joelho artificial a suavizar o flanco de uma engrenagem de Fórmula 1, e também ao processamento de ferramentas. Este processo é usado quando se precisa alta qualidade superficial, melhor distribuição das cargas ou um arredondamento bem definido, pois é um processo confiável e reproduzível (TIKAL, 2009).

Também conhecido como retificação por arraste ou acabamento por deslizamento, este processo tem como base a imersão da ferramenta em meio abrasivo. Este meio contém diversos elementos cerâmicos com granulometrias conhecidas, utilizadas de acordo com o arredondamento de gume ou polimento requerido. O processo é realizado com o deslocamento da ferramenta através do meio, sofrendo a ação abrasiva dos grãos (OTEC, 2008).

As máquinas mais modernas utilizam um sistema planetário, em que a ferramenta ali fixada para realizar o tratamento, giram em torno do seu eixo enquanto a máquina faz com que a ferramenta realize o movimento de translação. Através desta combinação de movimentos, o processo resulta em um tratamento uniforme de todas as áreas da ferramenta (RISSE, 2006;

OTEC, 2008). A figura 7 ilustra as direções e movimentos realizados durante o processo de acabamento por arraste.

Figura 7 – Cinemática do processo de acabamento por arraste e máquina



Fonte: Adaptado de Bordin, 2013

Um dos tipos de mídia abrasiva é constituída basicamente de três materiais: uma substância de granulometria maior, como por exemplo, grãos de casca de noz; um aditivo abrasivo; e um ligante para realizar a adesão entre os grãos e o material abrasivo. Especialmente no caso de mídias composta de casca de noz, estas recebem adição de abrasivos que tem o papel de realizar o polimento ou a retificação. O granulado em si age apenas como um agente que transporta o material abrasivo. Este abrasivo consiste de um pó misturado a um óleo adesivo de alta viscosidade. O abrasivo é o responsável pela capacidade de remoção e a geração das superfícies nas peças (TIKAL, 2009)

O tratamento de acabamento por arraste, em ferramentas, é empregado para suavização das bordas dos gumes e também para remover aglomerações provenientes do processo de revestimento (BORDIN, 2013). Ferramentas rotativas representam um desafio para a realização de tratamentos, por conta da sua topografia complexa. O acabamento por arraste é indicado para estes casos por garantir uma ação homogênea em toda superfície por mais complexa que seja (PAUCKSH, 2008).

A ferramenta tratada de forma a obter arredondamento dos gumes, tem como característica o aumento dos esforços na usinagem e uma redução no seu desgaste em comparação com ferramentas não tratadas (RISSE, 2005). No entanto, ainda se busca um consenso sobre o tratamento realizado na ferramenta e seu impacto sobre a rugosidade obtida na peça.

2.3.3 *Influência do tratamento de gume sobre a integridade*

Como resultados do tratamento de gume na ferramenta, pode-se obter variação no raio, na forma do gume ou até mesmo alterações na rugosidade das superfícies próximas. O tratamento de gume pode influenciar o processo, aumentando a vida da ferramenta como também influenciando na rugosidade ou até mesmo nas forças de usinagem. Porém, os tratamentos podem também não ter um impacto significativo ou até mesmo diminuir a vida da ferramenta.

Para avaliar os diferentes métodos de preparação, o estudo de Bouzakis et al. (2014) analisou a influência de diferentes métodos de preparação de gume no fresamento a seco de diferentes materiais. Os acabamentos testados foram polimento magnético, acabamento por arraste, jateamento de partículas abrasivas, acabamento por laser, usinagem por fluxo abrasivo, polimento com cerdas abrasivas, acabamento por retificação e acabamento por EDM (*Electric Discharge Machining*). Os materiais usinados foram o aço 42CrMo4, aço inoxidável 304L, as ligas Inconel 718 e Ti4Al6V. Os autores notaram que o tratamento tem impactos variados quando feito em ferramentas utilizadas na usinagem de diferentes materiais, cada tratamento se comportando de maneira diferente dependendo do material, e em alguns casos diminuindo o desempenho.

Além do impacto dos tratamentos na durabilidade da ferramenta, ocorre também a sua influência na superfície resultante da usinagem em si. No estudo publicado por Denkena et al. (2012), para uma operação de fresamento, os autores observaram que superfícies produzidas com menores raios de gumes geram menores tensões residuais do que ferramentas com maiores raios. As tensões observadas para as condições testadas foram de natureza trativa.

Uhlmann et al. (2016 a, b) analisaram o impacto de tratamentos de gume sobre as forças de usinagem, desgaste e rugosidade. Os tratamentos abordados foram polimento por cerdas abrasivas, jateamento, polimento magnético e acabamento por arraste. Os resultados apontam os processos de polimento magnético e acabamento por arraste como melhores alternativas, por resultar em menores forças e um aumento na vida da ferramenta. Os raios

intermediários produzidos obtiveram o melhor comportamento de rugosidade. Estes resultados reforçam a influência do raio de gume sobre as forças de usinagem, desgaste e rugosidade obtida.

Zeilmann et al. (2013), no fresamento de topo de um aço ABNT P20, com fresas de aço-rápido de topo reto com e sem tratamento de gume, identificaram que a rugosidade obtida não possui variação estatística, dado a dispersão dos valores. Os autores observaram ainda que, para a textura, a ferramenta não tratada gerou marcas de passagem da ferramenta mais definidas que a ferramenta tratada. Isso se deve, segundo os autores, ao fato de que com o aumento do raio de gume gerado pelo tratamento, ocorre um aumento da área de contato entre o gume e a superfície. Esta condição tende a ocasionar um rebaixamento das cristas geradas pela passagem da ferramenta. Ainda, os autores verificaram as características subsuperficiais do material. Ferramentas tratadas obtiveram menor espessura de camada afetada, que segundo os autores, foi decorrente da melhor distribuição dos esforços no gume tratado. A condição acaba levando a uma menor geração de atrito e calor, e conseqüentemente, menores deformações plásticas.

2.3.4 Influência do tratamento de gume sobre o desgaste

O desgaste de flanco e a vida da ferramenta são afetados pela geometria do gume, especialmente o raio de gume, e o processo utilizado para o arredondamento do gume (RODRIGUES, 2009).

Uma série de trabalhos foi realizada com o objetivo de observar as relações entre o tratamento do gume e seu desgaste no processo. Em processos como torneamento, pode-se citar o trabalho de Ventura et al. de 2015, onde foi avaliada a influência da geometria do gume sobre o desgaste em operação de torneamento interrompido de um aço endurecido. Na comparação entre ferramentas com chanfro e arredondadas, o estudo constatou que a carga mecânica e o desgaste aumentam com o incremento do arredondamento do gume e a diminuição do fator de forma.

Em uma operação de fresamento de aço 42CrMo4, Denkena et al. (2012) avaliaram a influência da geometria do gume no desgaste e integridade superficial da peça. As geometrias foram obtidas por meio de polimento com cerdas abrasivas, e as análises indicaram uma forte relação entre a forma, o raio do gume e seu comportamento no desgaste. As ferramentas tratadas tiveram um aumento na vida, tendo melhores resultados as ferramentas com $K=1$ e $S_{\alpha}=S_{\gamma}$ de 30 μm . Fulemová e Janda (2014), também estudaram este tema na operação de fresamento com insertos. Constataram que os maiores raios de gume testados resultaram nas maiores vidas das

ferramentas para o fresamento de um aço ferrítico-martensítico. Além disso, entre os processos testados, o processo de acabamento por arraste demonstrou as menores forças de corte e menor desgaste.

Em 2014, Uhlmann et al. avaliaram a preparação de gume em micro fresas. Entre os raios de gume de 2, 4 e 8 μm testados, o raio de 8 μm teve os melhores resultados em termos de desgaste. Uhlmann et al., (2016a e 2016b) constataram a relação do tratamento com as forças de usinagem, o desgaste e a superfície obtida.

2.4 Fluidos e sistemas de MQL

Pela implementação da usinagem com mínima quantidade de fluido lubrificante (MQL), o consumo de fluido pode ter significativa redução. A técnica de aplicação por MQL consiste em uma quantidade pequena de fluido enviada para a interface ferramenta-peça por um fluxo de ar comprimido. Em comparação com a usinagem a seco e com emulsão, foi constatado que em diversas situações o MQL consegue reduzir o atrito e a temperatura de corte (RAHIM, 2011)

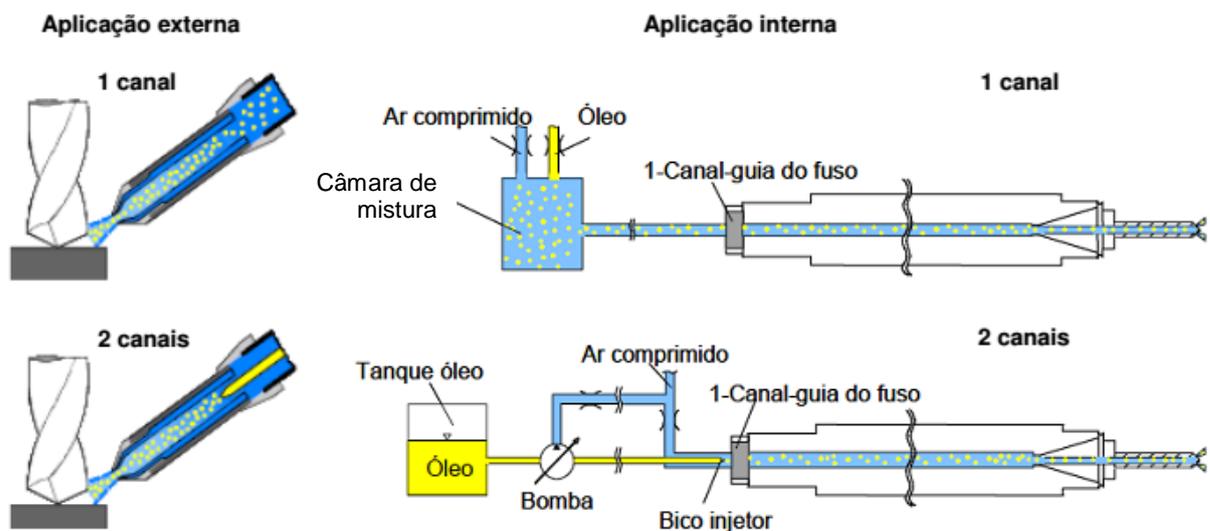
Entre outras vantagens estão ainda a diminuição do espaço para armazenamento de fluido em se comparando com emulsão. Um tanque de MQL ocupa um espaço com volume por volta de um litro, enquanto que um tanque para emulsão pode ocupar centenas ou até milhares de litros. Não há mais necessidade de grandes bombas convencionais para manter em funcionamento um sistema com emulsão. Não há necessidade de filtragem, ou manutenção destes sistemas, como substituição de filtros, e sem contaminação ou mesmo eliminação de material contaminado. Os cavacos serão mais secos e com maior valor, pois poderão ser reciclados diretamente e de maneira mais eficiente e com menos impacto ao meio ambiente (BYERS, 2006).

Inicialmente os sistemas MQL possuem uma classificação de acordo com o meio transportador. Um deles é o sistema com ausência de ar, nele a ferramenta recebe, por meio de uma bomba, gotículas finas e individuais que chegam de maneira dosada e sucessiva. Este método utiliza usualmente óleo. No segundo caso, o fluido é atomizado em gotículas finas com a ajuda de ar comprimido dentro de um bocal, chegando na forma de um aerossol na região do corte (KLOCKE, 2011)

Os sistemas de MQL comercialmente disponíveis podem ser divididos em dois grupos principais de acordo com a maneira que são aplicados: injeção do lubrificante externamente, por meio de jatos separados, e internamente, através de orifícios na ferramenta. Os sistemas de

aplicação recebem ainda distinção quanto à maneira que o fluido é atomizado, assim dividido por número de canais. Nos sistemas de um único canal, a mistura aerossol é formada em uma câmara de mistura externa e o canal funciona como rota de alimentação da mistura. No caso dos sistemas de dois canais, óleo e ar são alimentados separadamente e a mistura ar-óleo é produzida próximo ao ponto de aplicação (WEINERT et al, 2004), ambos estão representados na figura 8.

Figura 8 – Sistemas de MQL interno e externo



Fonte: Zeilmann et al., 2009

Como benefícios para o resultado da usinagem, a utilização do MQL pode até mesmo melhorar o acabamento superficial em comparação com o uso de emulsão. Kedare et al. (2014) aplicaram MQL de base vegetal em operação de fresamento com parâmetros de acabamento, e este apresentou uma melhora significativa no acabamento em comparação com o uso de emulsão. Além da integridade, a aplicação de MQL pode agir positivamente na vida da ferramenta. Em uma comparação com o processo a seco, Li e Chou (2010) realizaram testes de microfresamento com MQL. Os resultados mostraram aumento significativo na vida das ferramentas. Além disso o MQL garantiu uma maior estabilidade na rugosidade (R_a) ao longo da vida da ferramenta.

A interação entre a aplicação de MQL e as ferramentas submetidas a tratamentos de gume foi pouco estudada para o processo de fresamento. A aplicação de MQL em ferramentas com tratamento de gume é pouco abordada na literatura. Afim de entender o processo se busca explorar o comportamento da usinagem nestas condições.

2.4.1 Fluidos de base vegetal

Aproximadamente 85% de todos os lubrificantes utilizados no planeta contêm derivados de petróleo. No setor metal mecânico, grande parte dos fluidos são de base mineral. Estes fluidos aumentam a qualidade e a produtividade das operações de manufatura, refrigerando e lubrificando o processo durante o corte. Porém este tipo de fluido vem sendo uma significativa ameaça à saúde durante de seu ciclo de uso, com grande incidência de doenças em operadores, pela inalação e contato com a pele (SHASHIDHARA e JAYARAM, 2010).

Alternativas vem sendo estudadas para substituir estes fluidos, uma delas é o fluido de base vegetal. Geralmente, óleos vegetais são substitutos atrativos para aqueles baseados em petróleo por serem ecológicos, renováveis, menos tóxicos e biodegradáveis. A tabela 1 a seguir apresenta vantagens e desvantagens dos fluidos de base vegetal.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do óleo vegetal como lubrificante

Vantagens (requerimentos)	Desvantagens
Alta biodegradabilidade	Baixa estabilidade térmica
Baixa poluição do meio ambiente	Estabilidade oxidativa
Compatibilidade com aditivos	Alto ponto de congelamento
Baixo custo de produção	Baixa proteção contra corrosão
Grande Flexibilidade	
Baixa toxicidade	
Alto ponto de ignição	
Baixa volatilidade	
Alto índice de viscosidade	

Fonte: Adaptado de Shashidhara e Jayaram, 2010

2.4.2 Aditivos em fluidos de usinagem

Fluidos de base vegetal que apresentam aditivos em sua fórmula, em comparação com o fluido equivalente sem o aditivo, podem apresentar características como menor coeficiente de atrito e maior resistência a corrosão na região de corte. Aditivos químicos podem ter uma variedade vasta de funções. As mais importantes funções são: auxílio na lubrificação em condições de extrema pressão (EP), composição de emulsões, prevenção de corrosão, regulagem de pH, como elemento ligante, agente anti-espuma, prevenção de odores, ajuste do

ponto de ignição, melhora das características do fluido se espalhar e umidificar uma superfície (CETIN et al., 2011).

O desempenho dos fluidos com aditivos EP geralmente são melhores em termos de desgaste, rugosidade e forças de corte, melhorando a integridade superficial e a precisão em comparação ao fluido sem o aditivo. O aditivo EP tem a função de reduzir a adesão do cavaco sob altas pressões e melhorar a lubrificação sob altas temperaturas (CETIN et al., 2011).

A influência do aditivo no comportamento do desgaste pode ser observada no estudo de BIERLA et al. (2012), em uma operação de fresamento do aço 42CrMoV4. A utilização de aditivos reduziu o desgaste em comparação com o processo a seco e com o fluido sem aditivos.

2.5 Acabamento e integridade

Processos de usinagem são para gerar componentes funcionais. Assim sendo, a superfície e a subsuperfície dos componentes são decisivos para o seu funcionamento e durabilidade (TOENSHOFF e DENKENA, 2013).

O acabamento superficial além de ser decisivo para a precisão dos componentes usinados, também tem forte influência no desempenho do componente durante o seu uso. O acabamento e integridade superficiais estão ligados ao processo de geração da superfície. Enquanto o acabamento superficial descreve geometricamente a superfície, a integridade superficial diz respeito às propriedades do material como vida em fadiga, resistência a corrosão, todos com influência da natureza de obtenção da superfície (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

No entanto, a formação da superfície usinada é complexa e de difícil compreensão, principalmente em condições severas de usinagem. O processo se constitui em função das características físicas e propriedades mecânicas da superfície do material, e da variação desses elementos durante a usinagem (JAVIDI et al., 2008; VASHISTA e PAUL, 2009).

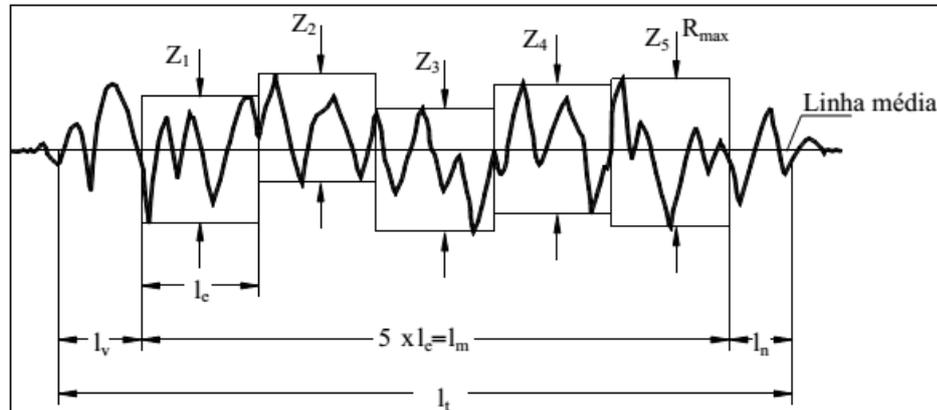
2.5.1 Rugosidade

A avaliação da rugosidade se dá, usualmente, através de um apalpador mecânico. Este percorre a superfície de amostragem, registrando através de uma ponteira o perfil da superfície (NICOLA, 2008; BET, 1999; ZEILMANN et al., 2006.) O perfil é exemplificado na figura 9.

Os sistemas de medição de rugosidade, baseados no critério da linha média podem ser agrupados em três classes (OLIVEIRA, 2006):

R_a , que é a rugosidade média, é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento de medição total (l_m).

Figura 9 – Representação esquemática do perfil de rugosidade usual.



Fonte: Adaptado de König, 1997

R_z , a qual corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial, (Z_i), sendo a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem.

R_y ou R_{max} , que corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e vale mais profundo no comprimento de medição unitário (l_e). Na Figura 9, pode-se observar o que o pico mais alto está em Z_2 e o vale mais profundo encontra-se em Z_5 . A distância de ambos configura a profundidade total da rugosidade $R_{máx}$ ou R_y .

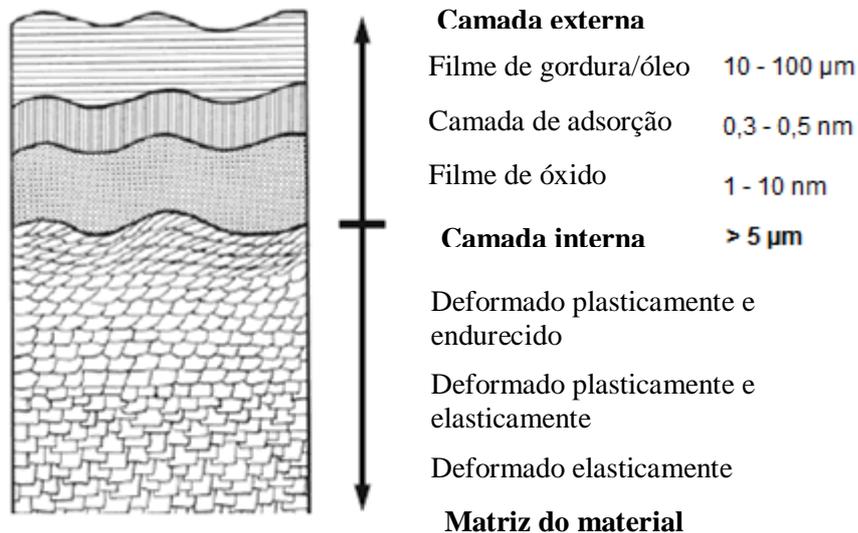
Entre outros parâmetros de rugosidade também se destacam R_p e R_v , que são respectivamente o maior pico e o maior vale de uma medição em relação à média. Há ainda o parâmetro R_q , que é um valor quadrático médio do perfil, este mais sensível a picos e vales maiores.

2.5.2 Camada Afetada Plasticamente

Não apenas a superfície como também a subsuperfície é exposta a múltiplos carregamentos no uso de um componente. A sobrecarga de um componente pode significar o fim de seu tempo de vida ou redução em seus ciclos de uso. Alterações da microestrutura são constatadas por meio de seções polidas. Através do lixamento e polimento é possível expor a microestrutura da subsuperfície e permite o reconhecimento de transformações cristalinas. O

mesmo método é adequado para determinar deformações que ocorreram por consequência do corte (TOENSHOFF, 2013). Na análise das deformações plásticas, é levada em consideração a espessura de material deformado a partir da camada limite interna, representada na figura 10.

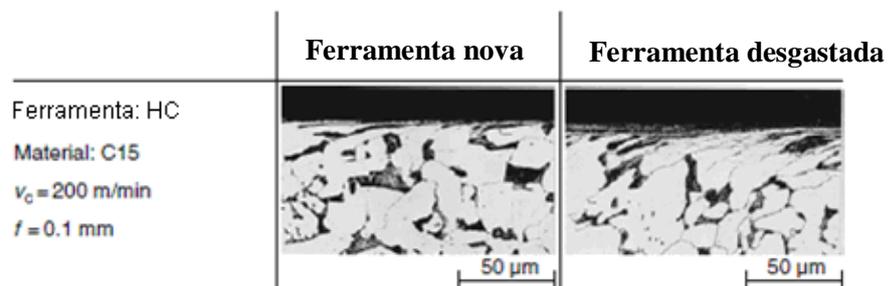
Figura 10 – Representação dos elementos presentes numa seção de material



Fonte: Adaptado de Klocke, 2011

A camada limite interna é a camada do corpo usinado ligado ao material base, possuindo praticamente a mesma composição química. A estrutura física e a expansão desta camada em direção ao interior da peça dependem ambos do tipo de material e do processo de fabricação utilizado. A transição da região afetada para a região de estrutura não alterada é contínua e pode ser vista na figura 11 (KLOCKE, 2011).

Figura 11 – Exemplo da variação da deformação plástica com o desgaste



Fonte: Adaptado de Klocke, 2011

Primariamente se observa a inclinação dos grãos na direção do corte. Na região sem distorções nos grãos, se encontra o material base. Indo em direção a superfície que foi usinada, os grãos começam a apresentar deformação, com certo grau de inclinação. Na região mais próxima da superfície é possível observar que a orientação dos grãos tende à um alinhamento para com a direção do corte com grão mais afinados (VELÁSQUEZ et al., 2010).

A tendência ao aumento da camada deformada, até mesmo no fresamento, pode estar ligada ao aumento do raio devido ao desgaste. Raio este que se aproxima do valor do avanço. O aumento do raio pode levar à um ângulo de saída negativo e um aumento na deformação. O resultado pode ser o material plasticamente deformado lateralmente e à frente da ferramenta, em vez de formar um cavaco cisalhado (ZEILMANN et al., 2013).

2.6 Desgaste no fresamento

Durante o processo de corte, a área do gume é submetida a deformações e atrito levando ao desgaste de materiais. Os materiais das ferramentas são submetidos a forças de carregamento complexas, de natureza compressiva, em processos de alta velocidade com altas temperaturas. Na sua utilização, as ferramentas alcançam o final de sua vida em serviço por causa do desgaste contínuo em suas faces e flancos. O desgaste se dá pela progressiva perda de material de suas superfícies, causada pelas solicitações mecânicas, contato e movimentos relativos (KLOCKE, 2011).

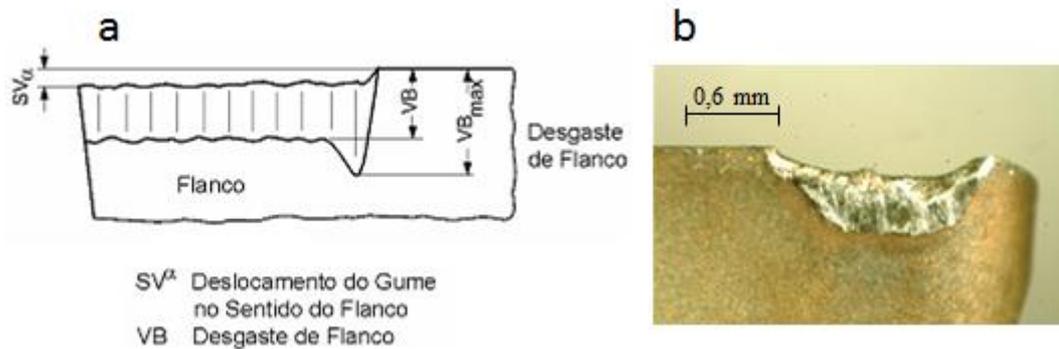
2.6.1 Mecanismos e tipos de desgaste

Diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente durante o processo, de forma que tanto sua causa quanto seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si. O tipo de desgaste predominante em uma operação de usinagem depende do material que está sendo usinado, o material da ferramenta e as condições de corte (KISHAWY et al. 2005). Como principais mecanismos responsáveis pelo desgaste de ferramentas, estão a oxidação, a difusão, a adesão e a abrasão mecânica (STEMMER, 2005; KÖNIG, 1997; FERRARESI, 1970).

A abrasão é uma das principais causas de desgaste na ferramenta e gera principalmente o desgaste de flanco, visto que esta região da ferramenta atrita com um material rígido (peça) enquanto que a face da ferramenta atrita com um elemento flexível (cavaco) (DINIZ et al. 2001). A figura 12 (a) ilustra o desgaste na região do flanco. A direita (b) está um exemplo de desgaste em uma pastilha de fresamento. O fato da ferramenta possuir o revestimento de

coloração dourada propicia um contraste facilitando a visualização da região onde ocorreu o desgaste.

Figura 12 – Ilustração do desgaste de flanco e exemplo em uma fresa



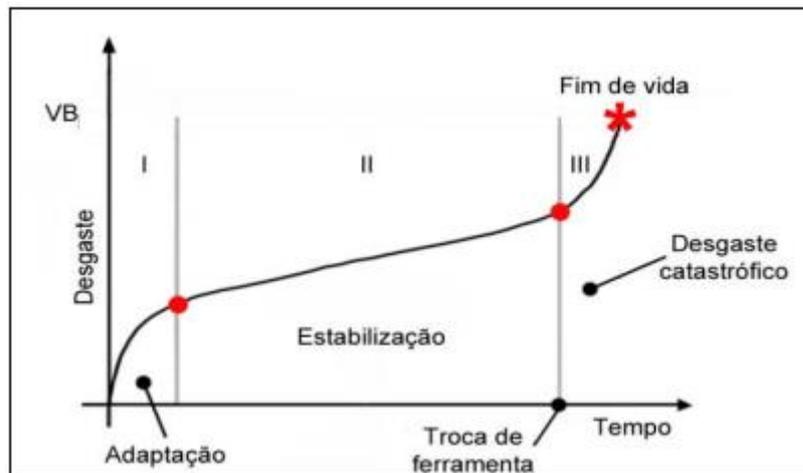
Fonte: Adaptado de Klocke, 2011(a), Zeilmann, 2010(b)

Entre as dimensões medidas no desgaste, destacam-se o valor médio do desgaste de flanco (V_B), e o seu valor máximo, definido como ($V_{B_{máx}}$) (KLOCKE, 2011; DINIZ et al. 2001). Este tipo de desgaste prejudica o acabamento superficial da peça por modificar a forma do gume da ferramenta, podendo causar mudanças dimensionais, afetando assim as tolerâncias (DINIZ et al. 2001).

O processo de fresamento por sua cinemática possui características específicas que aumentam a taxa de desgaste das ferramentas. O processo se caracteriza pela variação de carga térmica e mecânica decorrente da saída e reentrada da ferramenta. A variação de temperatura pode causar tensões que resultam em trincas térmicas. Já a variação nas cargas mecânicas pode ocasionar o surgimento de trincas devido à fadiga (DINIZ et al. 2001).

Em condições de corte adequadas, as ferramentas tendem a seguir um comportamento padrão como mostrado na figura 13. A evolução do desgaste apresenta três estágios (MACHADO et al. 2009): no estágio I ocorre um desgaste acelerado, natural da adequação ao sistema tribológico envolvido; no estágio II o desgaste alcança uma taxa constante de aumento, com a ferramenta realizando o corte de maneira estável; e finalmente o estágio III representa uma aceleração do desgaste, onde as temperaturas e tensões envolvidas promoverão o colapso da ferramenta com a continuidade do corte.

Figura 13 – Comportamento da curva padrão de desgaste



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2009)

2.6.2 Vida da ferramenta

Vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente sem perder sua capacidade de corte, até que um critério de fim de vida previamente estabelecido seja atingido. Após ser atingido esse tempo, a ferramenta deve ser substituída. As consequências por não realizar a substituição no momento adequado são: aumento excessivo das forças de usinagem, acabamento superficial não adequado, e possível quebra da ferramenta (FERRARESI, 1970).

Entre os critérios para fim de vida, estão a atribuição de valores limites para os desgastes encontrados (V_B e $V_{Bmáx}$). Outras formas também utilizadas são tempo efetivo de trabalho, percurso de corte, número de peças produzidas e rugosidade da peça (DINIZ et al., 2001).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as metodologias experimentais utilizadas, planejamento, equipamentos, ferramentas e materiais utilizados. Além dos procedimentos para avaliação dos resultados.

3.1 Planejamento experimental

O planejamento aqui desenvolvido consiste na realização de testes com ferramentas que possuem três microgeometrias diferentes, em um corpo de prova com dimensões definidas. Além disso, três condições de aplicação de fluido são avaliadas. Isto caracteriza dois níveis com três fatores, configurando um planejamento fatorial 3^2 . Os parâmetros de corte são fixos em todo o experimento.

3.1.1 Variáveis de entrada

Em um processo de usinagem o número de variáveis que tem influência é muito grande. Com o objetivo de compreender e caracterizar a integridade da superfície em função da microgeometria e aplicação de fluido, alguns parâmetros foram mantidos constantes. A velocidade de corte utilizada (v_c) e avanço (f_z) foram mantidas, 180 m/min e 0,06 mm/gume, respectivamente. Os ensaios de fresamento são realizados com passes de 252 mm de comprimento, com profundidade axial (a_p) e profundidade lateral (a_e) fixos, respectivamente de 0,5 mm e de 0,2 mm. A estratégia de usinagem utilizada em todo ensaio é concordante.

As condições de aplicação de fluidos utilizadas são: seco, MQL de base vegetal (MQL1) e MQL de base vegetal com aditivo de extrema pressão (MQL2). As condições de microgeometria estudadas são acabamento por arraste (AA) e polimento por cerdas abrasivas (POL), além do estado original de fábrica (OF).

Para aumentar a confiabilidade dos resultados, para cada microgeometria experimentada são utilizadas duas ferramentas com tréplica quando necessário, totalizando um mínimo de dezoito corridas. A tabela 2 mostra o mapa geral dos ensaios na ordem executada.

Tabela 2 – Sequência das condições testadas

N Teste	Tratamento	Condição	x1	x2	Ordem	Etapa**
1	OF	Seco	-1	-1	1	Etapa 1
2	OF	Seco	-1	-1	2	
3	OF	MQL2	-1	+1	3	
4	OF	MQL2	-1	+1	4	
5	OF	MQL1	-1	0	12	Etapa 2
6	OF	MQL1	-1	0	15	
7	AA	Seco	+1	-1	5	
8	AA	Seco	+1	-1	16	
9	AA	MQL1	+1	0	11	
10	AA	MQL1	+1	0	10	
11	AA	MQL2	+1	+1	7	
12	AA	MQL2	+1	+1	8	
13	POL	Seco	0	-1	6	
14	POL	Seco	0	-1	14	
15	POL	MQL1	0	0	13	
16	POL	MQL1	0	0	17	
17	POL	MQL2	0	+1	9	
18	POL	MQL2	0	+1	20	
19*	OF	MQL2	-1	+1	18	
20*	AA	Seco	+1	-1	19	

* Realização de réplica

** Divisão do ensaio. Dados da Etapa 1 são de ensaio compartilhado com outro trabalho.

Fonte: O autor, 2016

3.1.2 Variáveis de Saída

Como variáveis de saída do processo na peça trabalhada, a avaliação da integridade superficial é realizada através da observação metalográfica, medição das deformações plásticas, dureza por microindentação, rugosidade e textura. O ensaio foi conduzido até que uma das condições de fim de vida seja alcançada sendo estas, desgaste de flanco máximo ($V_{B_{max}}$) de 0,2 mm ou eventual lascamento da ferramenta.

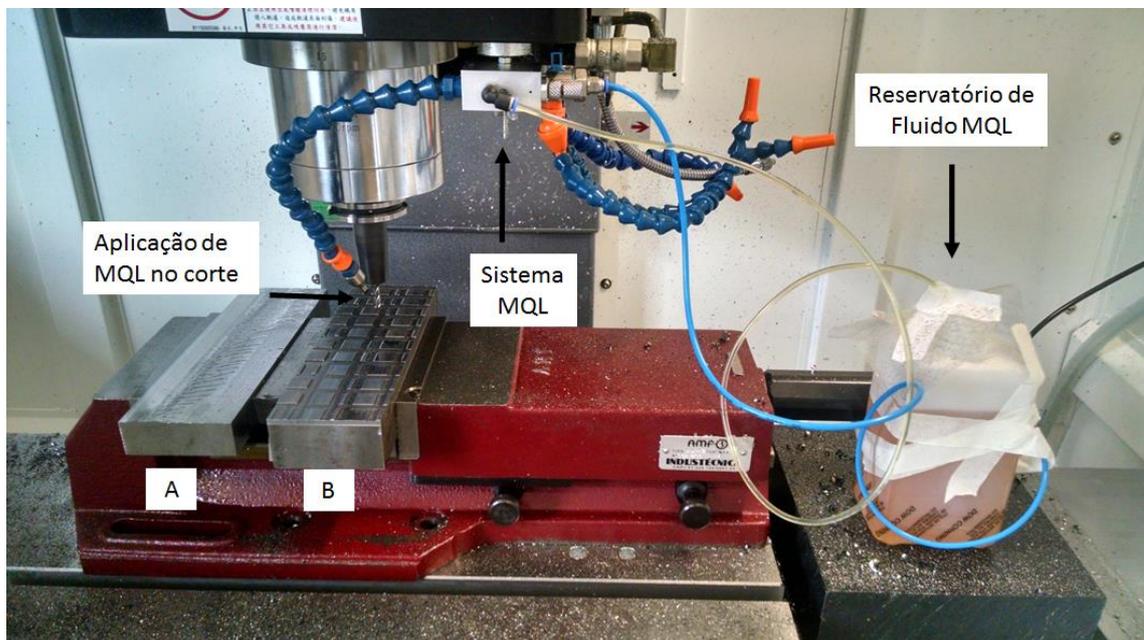
Os parâmetros de rugosidade e textura avaliados são R_a , R_z e R_{max} , mensurados no início, em dois momentos no meio e fim de vida. Os parâmetros de medição utilizados são *cut-off* de 0,8 mm e 4 a 6 medições por região usinada.

As deformações plásticas são medidas em termos de A_{I_a} , A_{I_z} e A_{I_y} que são de certa forma semelhante aos parâmetros de rugosidade, porém para profundidade de camada afetada.

3.2 Material e Corpo de Prova

Tendo em vista a realidade da região, optou-se como material o aço AISI P20, de dureza média 38 HR_c, muito utilizado nas indústrias de moldes e matrizes de injeção de plásticos. A composição química do aço utilizado está no ANEXO A. Os corpos de prova têm dimensões de 252 mm x 80 mm x 60 mm, com faces retificadas para garantir um melhor posicionamento e planicidade na fixação na máquina ferramenta. A montagem do ensaio na máquina pode ser observada na figura 14.

Figura 14 – Corpos fixados na máquina

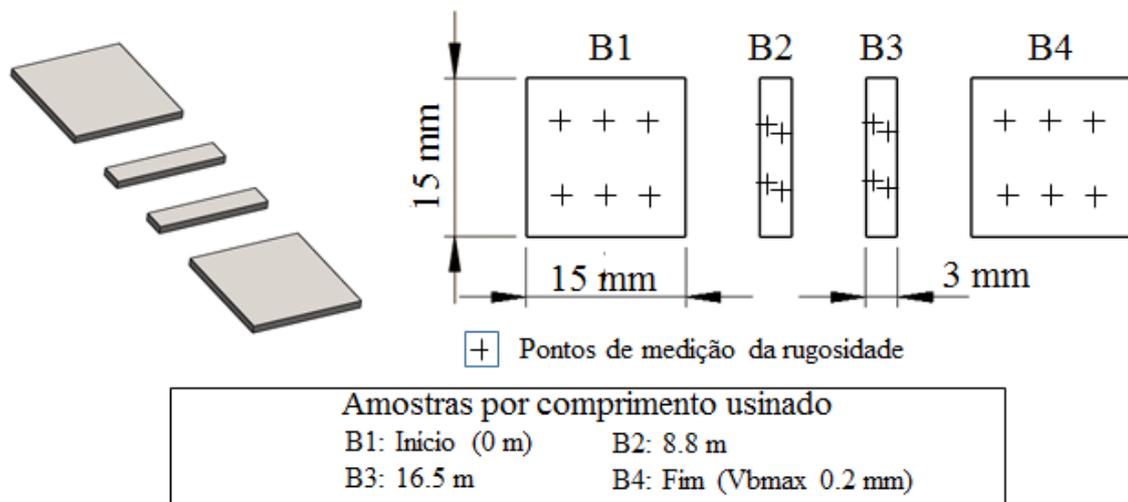


Fonte: O autor, 2016

Foram utilizados dois tipos de corpo de prova no ensaio. O bloco onde ocorre a maior parte da usinagem (A) e o bloco onde foi realizada a captura das superfícies em certos momentos da vida da ferramenta (B), no caso; início com a ferramenta nova (B1), após a usinagem de 8,8 metros (B2), após 16,5 metros (B3) e fim de vida (B4). A figura 15 ilustra os corpos de prova utilizados, bem como as posições onde foram realizadas medições.

Para cada condição foram usinadas duas regiões de 15 por 15 mm (B1 e B4) e duas de 3 por 15 mm (B2 e B3) do corpo de prova B, totalizando quatro estágios da vida da ferramenta.

Figura 15 – Corpos de prova e pontos de medição de rugosidade



Fonte: O autor, 2016

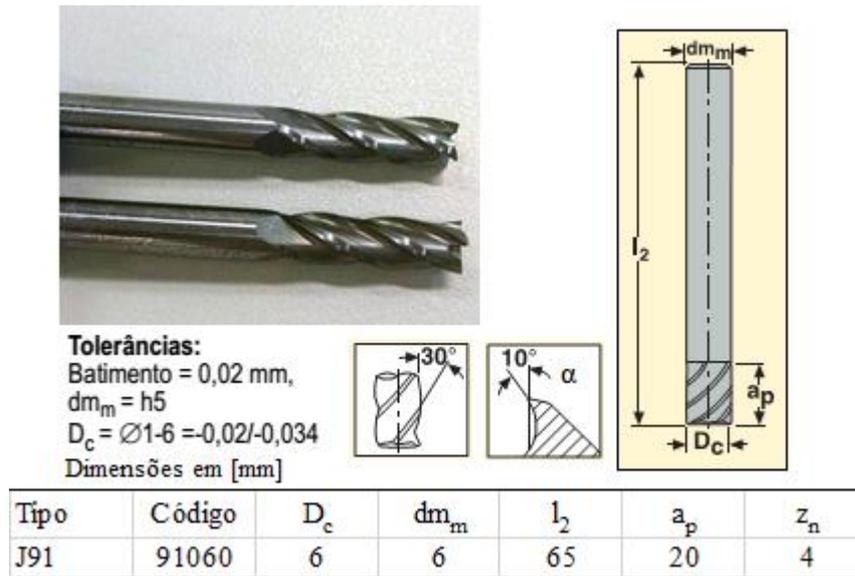
Este corpo de prova foi criado com ressaltos que atuam como um corpo de prova reduzido. As regiões B1 e B4 foram concebidas para um posterior teste de tensões residuais, que não será abordado neste trabalho. As regiões B2 e B3 foram concebidas para medição de rugosidade. A região B2 foi escolhida para análise metalográfica das deformações plásticas e dureza por micro endentação por se tratar de uma região onde a ferramenta já realiza um corte estável, mas ainda não apresenta desgaste considerável.

3.3 Ferramentas

As fresas utilizadas são de metal-duro, com diâmetro de 6 mm com quatro gumes. Para o teste foram utilizadas fresas não revestidas e com geometria de afiação original, fornecidas pela Seco Tools, de código 91060 da linha Jabro. Na figura 16 são mostrados detalhes da ferramenta.

Conforme o fabricante, trata-se de uma ferramenta sem raio de quina, em seu estado original, e sem revestimento. Com estas características se torna possível observar de forma mais clara os efeitos dos tratamentos sobre a geometria da ferramenta.

Figura 16 – Fresa de topo inteiriça de metal duro com canto vivo



Fonte: Adaptado de Seco Tools, 2008

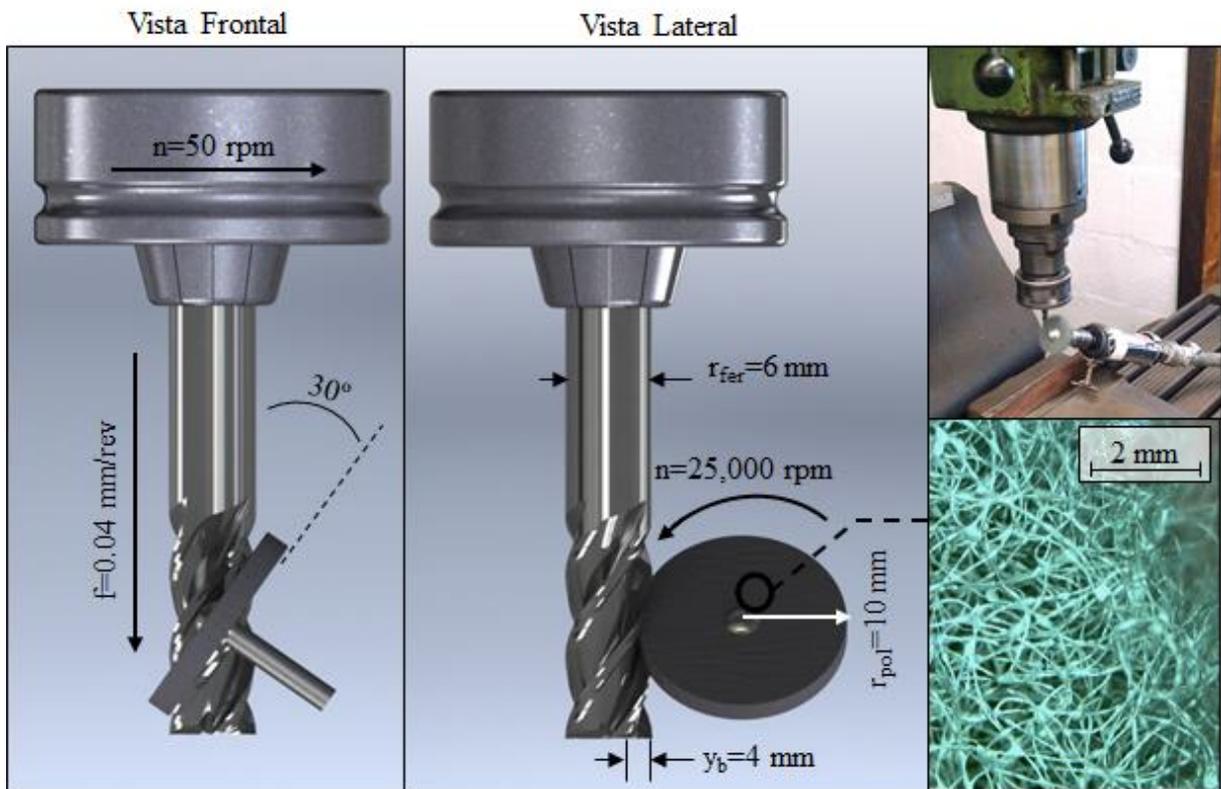
3.3.1 Polimento com cerdas abrasivas

O processo de polimento foi realizado nas dependências da UCS, utilizando uma esponja dotada de cerdas abrasivas. A esponja foi fixada a uma mini retífica manual e pneumática, da marca Campbell Hausfeld, rotacionando a uma velocidade de 25.000 rpm, operando com pressão de 4 bar. A mini retífica foi presa a mesa de uma fresadora mecânica Romi, modelo F – 20, por meio de um suporte em conjunto com uma morsa.

A ferramenta foi fixada a pinça da fresadora, com velocidade de rotação de 50 rpm, no sentido contrário ao corte da ferramenta, e avanço (f) de 0,04 mm. A posição da esponja foi ajustada com ângulo de 30° de modo a ser o mesmo ângulo de hélice da ferramenta. A profundidade de contato foi ajustada para aproximadamente 4 mm. A figura 17 mostra o posicionamento. O tempo de processo para uma ferramenta foi de aproximadamente 1 minuto.

A esponja abrasiva foi caracterizada por meio de imagens de MEV e as substâncias que a constituem foram analisadas por meio de EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*).

Figura 17 – Processo de polimento



Fonte: O autor, 2016

3.3.2 Acabamento por arraste

O acabamento por arraste foi realizado em parceria com a empresa Lesi. Se utilizou uma mídia abrasiva indicada para dar melhor acabamento superficial e agir menos no arredondamento. A mídia utilizada foi a H4/400, à base de grãos de casca de noz e pó de diamante, unidos um ao outro por uma substância ligante. A mídia é fornecida pela empresa OTEC, mesma fabricante da máquina que realiza o processo. Ambas as rotações da ferramenta e da árvore foram de 40 rpm. As ferramentas permaneceram rotacionando na mídia abrasiva, no sentido de corte, por 10 minutos.

Do mesmo modo que a esponja abrasiva, a mídia abrasiva foi caracterizada por meio de MEV.

3.4 Equipamentos

O centro de usinagem utilizado é o modelo LG-500 da marca Hartford, com potência de 10 kW e rotação máxima de 10.000 rpm. A máquina situa-se no bloco D, no laboratório de novas tecnologias de produção LNTP, nas dependências da Universidade de Caxias do Sul.

Para as análises de rugosidade é utilizado um rugosímetro portátil da marca Mitutoyo, modelo SJ-301, com capacidade de obter medições a uma resolução de 0,01 μm e um raio da ponta do apalpador de diamante de 5 μm e conicidade de 90°. A textura da superfície é obtida com auxílio de um estereoscópio trinocular de medição universal, da marca Entex, modelo TNE-10B. As imagens metalográficas são obtidas com auxílio de um microscópio ótico, da marca Nikon, modelo Epiphot 200 e as medições de deformação plástica, com o auxílio do *software* Imagine, desenvolvido na universidade. Os ensaios de dureza por microindentação são realizados com auxílio de um microdurômetro, da marca Shimadzu Mitutoyo, modelo HMV-2, com carga de 0,025 kgf.

Para verificar a homogeneidade das ferramentas, foram realizadas medições em uma máquina de medição universal por perfil Zoller modelo Genius 3, em parceria com a empresa Secta. Entre as medições se destacam raio e ângulo de hélice.

A caracterização das ferramentas foi realizada com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo, marca Tescan, modelo Mira 3, situado no laboratório central de microscopia, dentro da Universidade de Caxias do Sul. A medição da microgeometria e rugosidade nas ferramentas foi realizada no equipamento Inifinite Focus G5 com o módulo EdgeMaster, da empresa Alicona, situado no Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE), na cidade de Brusque.

O processo de acabamento por arraste foi realizado em uma máquina OTEC, modelo DF-3 Tool, em parceria com as empresas Lesi e Seco Tools. Todos os equipamentos utilizados podem ser observados no ANEXO B.

3.5 Fluidos e sistema de MQL

Para a aplicação do fluido em MQL, foi utilizado o sistema da empresa Tapmatic, de um canal que funciona por princípio pneumático, com ajuste de vazão de ar e fluido. Foi utilizada uma pressão de 5 bar na rede pneumática. A vazão foi ajustada para 30 ml/h e o bocal foi posicionado com um ângulo de 30°, com seu jato direcionado para a ponta da ferramenta.

Os fluidos utilizados foram cedidos pela empresa Blazer Swissslube. Ambos são à base de óleo vegetal, porém um deles tem adição de aditivos à base de zinco e enxofre. O fluido apenas de base vegetal (MQL1), de nome Vascomill MKS 22, possui viscosidade cinemática de 22 mm²/s à 20 °C. O fluido que possui aditivo (MQL2), de nome Vascomill MKS 42, possui viscosidade cinemática de 42 mm²/s à 20 °C.

3.6 Pré-teste

A seção a seguir expõe o procedimento de pré-teste até a chegada na estratégia definitiva para o ensaio. Foram testadas diferentes velocidades e condições. O objetivo desta etapa é determinar uma metodologia adequada para realização dos testes definitivos bem como definir os parâmetros de corte.

Inicialmente existiam as possibilidades de utilizar parâmetros classificados como semi-desbaste ou parâmetros de acabamento. Optou-se por iniciar os testes com parâmetros de semi-desbaste, ligeiramente mais severos que os recomendados em catálogo. A fim de encurtar o período de testes e também de avaliar a possibilidade de extrair o máximo das ferramentas, diferentes velocidades de corte foram testadas. Os parâmetros fixos utilizados no pré-teste foram: avanço (f_z) de 0,02 mm/gume, a_e de 2 mm e a_p de 0,5 mm o que caracteriza semi-desbaste. As velocidades e condições testadas são reportadas na Tabela 3, juntamente com a quantidade de testes.

Tabela 3 – Velocidades, condições e número de ferramentas do pré-teste.

Velocidade	Seco	MQL2
120 m/min	1	0
160 m/min	1	1
180 m/min	2	2

Para o pré-teste foram utilizadas fresas inteiriças de metal-duro com diâmetro de 6 mm com quatro gumes e que haviam passado por uma reafiação e acabamento por arraste, antes da aplicação de seu revestimento, de TiAlN.

Com o pré-teste foi possível definir os momentos para realização das pausas para medição de desgaste assim como avaliar o tempo de vida e duração do ensaio. O ensaio foi interrompido quando o desgaste (V_{Bmax}) chegou a marca de 0,3 mm ou quando houve lascamento da ferramenta, sendo estes os critérios de fim de vida adotados no pré-teste. Desta

forma, foi possível preservar a integridade da ferramenta para eventuais reafiações. O pré-teste ainda contribuiu para identificar a necessidade de ajustar os parâmetros para a condição de acabamento, visando reduzir o tempo de ensaio e o consumo do corpo de prova. Desta forma se optou por mudar o a_e de 2 mm para 0,2 mm, e o avanço (f_z) de 0,02 mm/gume para 0,06 mm/gume. Como a usinagem ocorreu de maneira adequada com os parâmetros mais severos, a velocidade (v_c) adotada foi de 180 m/min. O a_p de 0,5 mm não foi alterado. O critério de fim de vida foi ajustado para o desgaste (V_{Bmax}) de 0,2 mm, a fim de reduzir o tempo de ensaio e diminuir também os danos sofridos pela superfície em decorrência do desgaste da ferramenta. Um segundo pré-teste foi realizado para validar os novos parâmetros, e uma vez este transcorrido como esperado, os dados obtidos acabaram sendo integrados ao teste propriamente dito.

3.7 Análise estatística dos dados

Após os ensaios foram conduzidas análises de variância ANOVA, com um nível de confiança de 95%, ou seja, nível de significância de “ α ” de 5%, para dar suporte estatístico na análise dos resultados. Os dados foram avaliados e plotados com auxílio do software *IBM® SPSS Statistics*.

Os gráficos são apresentados na forma de *boxplot* sempre que possível, ou então em forma de barras ou dispersão. A interpretação é realizada a partir de análises quantitativas e qualitativas e de comparações dos resultados com a literatura existente.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados, tanto dos tratamentos realizados nas ferramentas, como os resultados experimentais obtidos do processo de fresamento. Primeiramente será abordada a caracterização das ferramentas para expor as diferenças entre elas. Na sequência são apresentadas as análises de integridade obtidas após a usinagem, bem como a análise estatística. Por fim, é apresentada uma análise sobre o desgaste das ferramentas no processo.

4.1 Caracterização das ferramentas após os tratamentos de gume

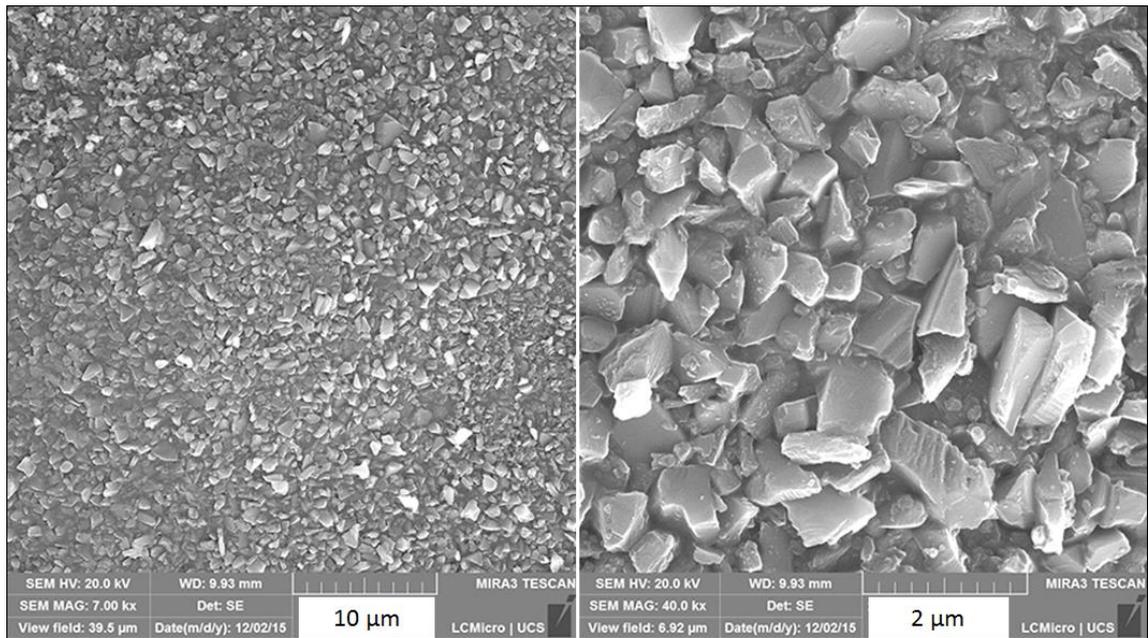
Com o objetivo de entender melhor a ação do tratamento de gume sobre a ferramenta, foi realizada uma caracterização dos tratamentos que foram aplicados. Além das ferramentas, foi realizado uma análise dos componentes responsáveis pelos tratamentos de gume, tornando visível a geometria presente tanto na mídia, no caso o acabamento por arraste, quanto a esponja de polimento. Foram realizadas imagens de microscopia eletrônica de varredura tanto para as ferramentas quanto para os componentes dos tratamentos de gume. Uma análise de EDS foi realizada na esponja de polimento para saber quais os materiais nela presentes.

4.1.1 Caracterização da mídia do acabamento por arraste

Foi realizada a análise da mídia comercial, conhecida comercialmente como H4/400, da empresa OTEC. Neste caso o meio abrasivo é constituído de grãos de casca de noz geradas com um tamanho homogêneo, juntamente com cristais de diamante sintético. Ambos são ligados por um ligante de alta viscosidade. Os dois componentes sólidos da mistura foram analisados individualmente. Na figura 18 é possível observar as características dos cristais de diamante.

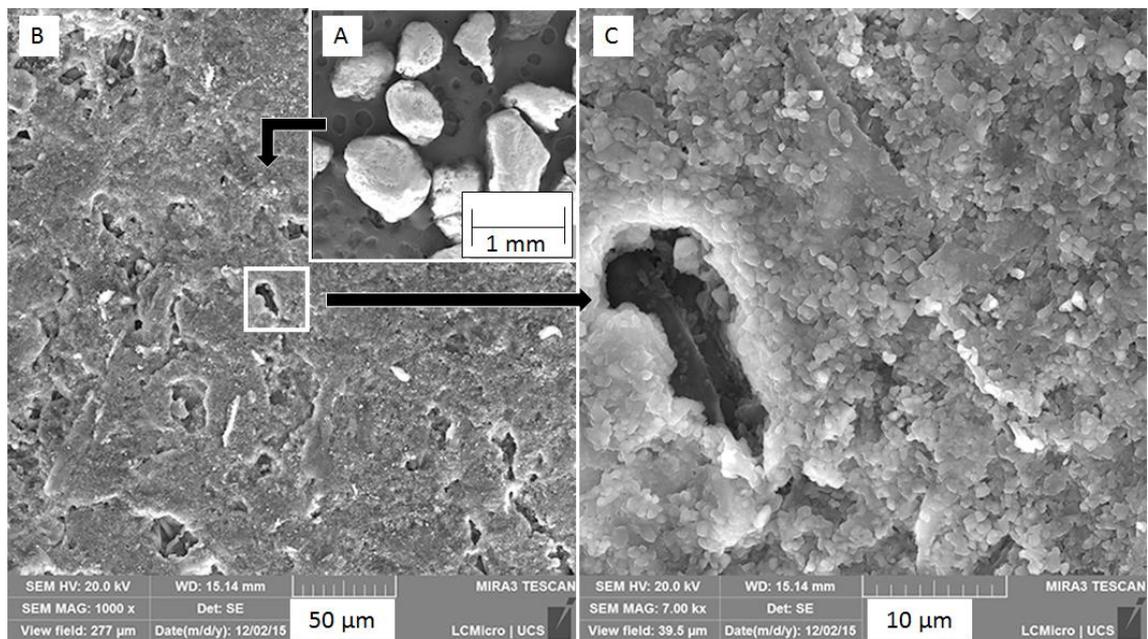
A forma dos cristais de diamante possui em sua maioria ângulos agudos, e dimensões entre 0,3 e 1,5 μm . Já na figura 19 se pode observar o grão de casca de noz e sua superfície em detalhe. Em (A) se tem uma vista a nível macro do tamanho do grão. Em (B) se tem uma vista da superfície do grão e em (C) a porosidade em detalhe.

Figura 18 – Cristais de diamante



Fonte: O autor, 2016

Figura 19 – Superfície do grão de casca de noz



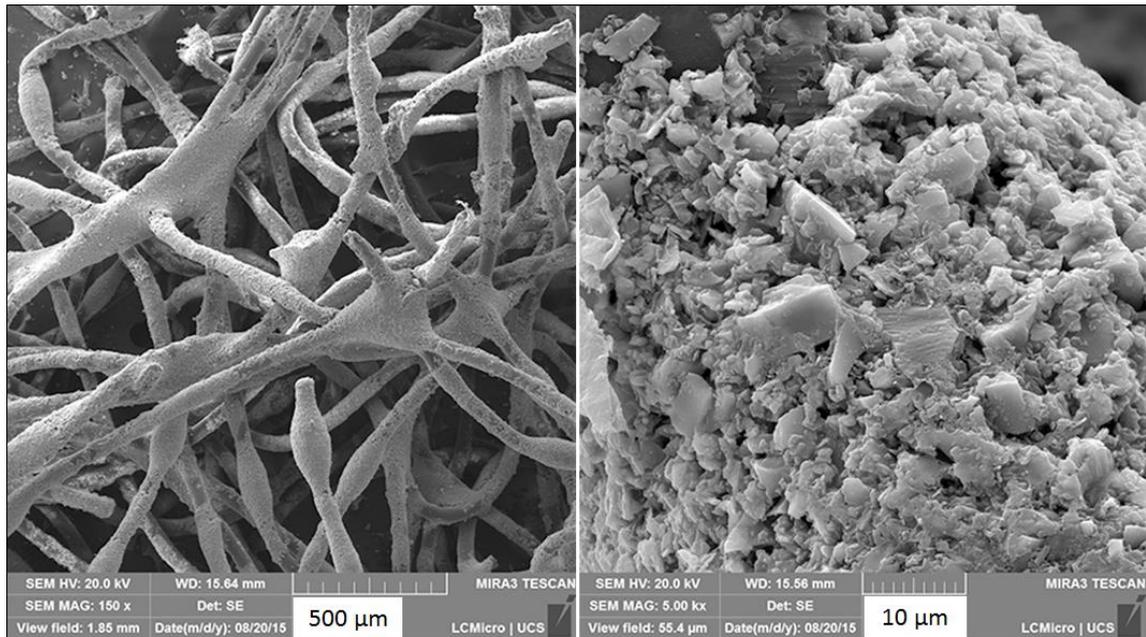
Fonte: O autor, 2016

A sua superfície tem um aspecto áspero e poroso, que deve ser um facilitador para a adesão dos cristais de diamante. Os grãos de casca de noz possuem dimensões de aproximadamente 0,8 mm. Este tipo de mídia é indicado para operações de pouca remoção, sendo utilizadas para gerar raios de gume de até 10 µm aproximadamente (TIKAL, 2009).

4.1.2 Caracterização da esponja de polimento

Com o detalhamento do material que compõem a esponja do processo de polimento, demonstrado na figura 20, é possível observar sua geometria e construção, como também a forma do material abrasivo responsável por remover material.

Figura 20 – Vista detalhada da esponja de polimento

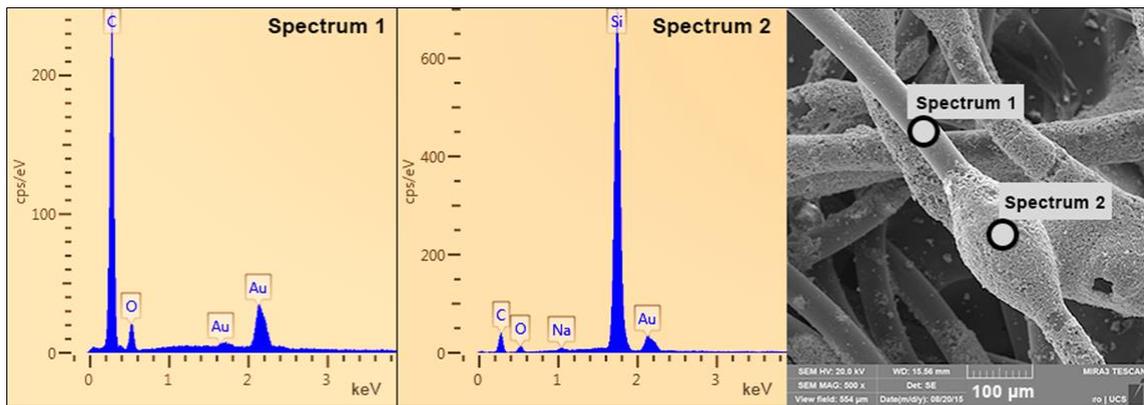


Fonte: O autor, 2016

A esponja é primariamente constituída de uma malha de fios com aproximadamente 50 µm de diâmetro. A partir da imagem, é possível estimar o processo de fabricação, em que em um primeiro momento a malha é fabricada e formando-se um emaranhado, para em um segundo momento receber o material abrasivo. Esse último aparece aderido ao fio, e seus cristais possuem um aspecto fragmentado. Apresentam dimensões variadas, indo de aproximadamente 1 a 10 µm. Os materiais que compõem a esponja foram obtidos por meio de EDS, trazido na figura 21. Por aspectos técnicos da análise, os materiais foram cobertos com ouro.

A análise por EDS, na região do *Spectrum 1*, ocorre em um local onde existe a fibra exposta. Já na região do *Spectrum 2*, a análise acontece onde existe o abrasivo depositado. As medições sustentam que a fibra é constituída primariamente de carbono, provavelmente sendo um *nylon*. O abrasivo, segundo a medição, é composto primariamente de silício, caracterizando um abrasivo de carbetto de silício.

Figura 21 – Análise por EDS da esponja de polimento.



Fonte: O autor, 2016.

4.1.3 Caracterização das ferramentas

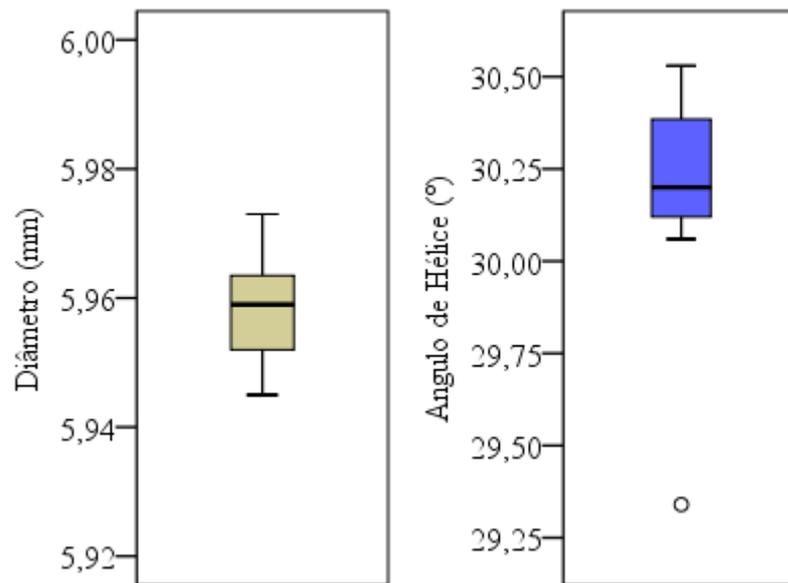
O detalhamento das características das ferramentas foi dividido entre: caracterização macrogeométrica, com dados da macrogeometria (diâmetro e ângulo de hélice); caracterização superficial, onde são apresentadas imagens de texturas obtidas por MEV e dados de rugosidade do gume; e caracterização microgeométrica, com medições de raio e de fator de forma, realizadas com auxílio de um microscópio de foco infinito.

4.1.3.1 Caracterização macrogeométrica

Uma parte das ferramentas foi submetida a medições em uma máquina de medição universal da marca Zoller, modelo genius 3. Na figura 22 seguem as medições de diâmetro e ângulo de hélice para uma amostra de 15 ferramentas.

Os dados mostram que as ferramentas têm dimensões próximas entre si, com o diâmetro girando em torno de 5,96 mm. Da mesma forma o ângulo de hélice, com valor nominal de 30°, fica em torno de 30,2°. Apenas uma ferramenta apresentou valor de ângulo diferente, com 29,34°. Esta ferramenta não foi utilizada nos testes.

Figura 22 – Medições de diâmetro e ângulo de hélice



Fonte: O autor, 2016

4.1.3.2 Caracterização superficial

Com objetivo de caracterizar a superfície das ferramentas diferenciando seus tratamentos, a figura 23 traz uma vista da quina, região onde o gume principal encontra o gume secundário.

Como parte da diferenciação entre as ferramentas, é possível observar as irregularidades que fazem parte da superfície da ferramenta original (OF) bem como as marcas de afiação, provenientes do processo de fabricação, marcas estas bem pronunciadas. A ferramenta que passou pelo acabamento por arraste (AA) apresenta uma superfície melhor definida, com menos irregularidades. A ferramenta que passou pelo processo de polimento com cerdas abrasivas (POL) apresenta uma superfície ligeiramente mais definida em comparação com a original, porém a mesma apresenta pequenos sulcos diagonais decorrentes da direção do polimento e uma maior suavização das marcas de afiação presentes na face. Uma vista mais próxima da superfície da ferramenta é trazida na figura 24, para observar a ação dos tratamentos na estrutura de grãos que constituem a ferramenta.

As irregularidades presentes na ferramenta original (OF) acabam revelando a estrutura granular do metal duro, proveniente do processo de metalurgia do pó em sua fabricação. Tais irregularidades durante o corte podem se tornar locais de acúmulo de tensões e facilitar a formação de trincas.

nesta condição é possível observar as marcas da passagem dos cristais de diamante presentes na mídia. Estas marcas são em todas as direções.

Na ferramenta polida (POL) existe uma presença menor de vazios entre partículas. A superfície apresenta as marcas da passagem das cerdas abrasivas, com uma direção bem definida.

Além da caracterização por microscopia eletrônica, foi realizada a medição por equipamento ótico de foco infinito, método indicado para medição de microgeometrias em ferramentas.

Um dos parâmetros medidos foi a rugosidade sobre a linha do gume. A medição foi realizada conforme as normas DIN 6581, DIN 6582 e ISO 3002. O *cut-off* utilizado nas medições é 250 μm . As medições realizadas foram divididas em dois grupos, as medições do gume principal e do gume secundário, mostradas na tabela 4. Os perfis de rugosidade estão no APÊNDICE B.

Tabela 4 – Valores de rugosidade medidas nos gumes principal e secundário

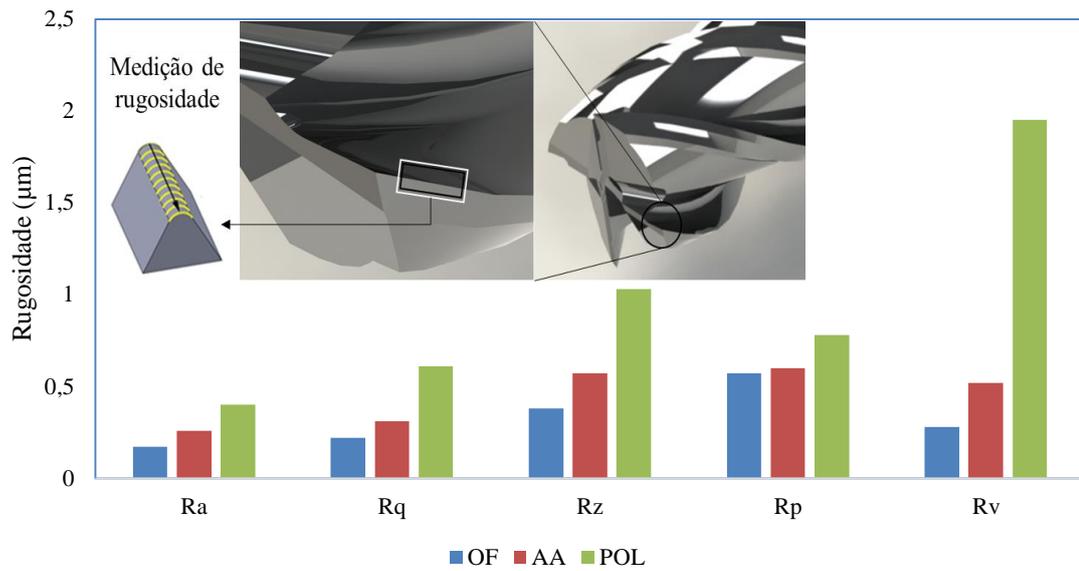
Parâmetro	Gume Principal			Gume Secundário			[u]
	OF	AA	POL	OF	AA	POL	
R_a	0,17	0,26	0,4	0,48	0,34	0,51	μm
R_q	0,22	0,31	0,61	0,54	0,37	0,55	μm
R_z	0,38	0,57	1,03	0,86	0,67	0,84	μm
R_p	0,57	0,6	0,78	0,71	0,66	0,76	μm
R_v	0,28	0,52	1,95	0,95	0,57	0,86	μm
L_c	Comprimento de <i>Cut-off</i>				250		μm

Fonte: O autor, 2016

Os valores são apresentados nos gráficos das figuras 25 e 26, para os gumes principal e secundário respectivamente.

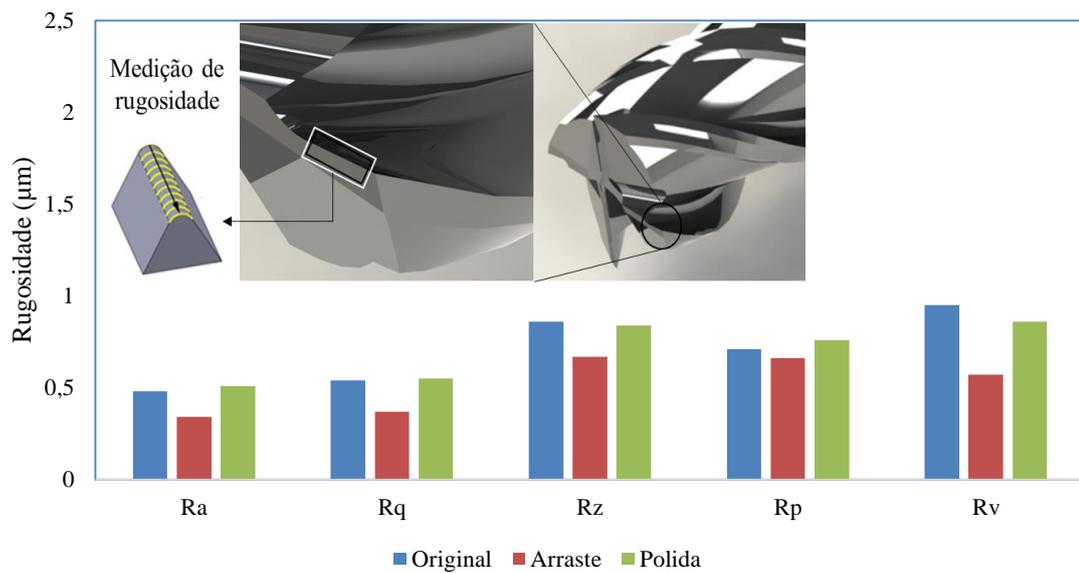
Os gráficos mostram que a ferramenta que recebeu o acabamento por arraste tem os valores de rugosidade mais homogêneos entre o gume principal e secundário. A ferramenta original apresentou menor rugosidade no gume principal e uma rugosidade ligeiramente elevada no gume secundário. A ferramenta com o polimento por cerdas abrasivas apresentou os maiores valores de R_a em ambos os gumes, e no gume principal apresentou os valores mais altos no parâmetro R_v . Os valores altos no gume principal na ferramenta POL podem ser decorrentes da cinemática do processo, como foi possível observar na figura 26, as marcas com orientação bem definida da passagem das cerdas.

Figura 25 – Valores de rugosidade medidos no gume principal



Fonte: O autor, 2016

Figura 26 – Valores de rugosidade medidos no gume secundário

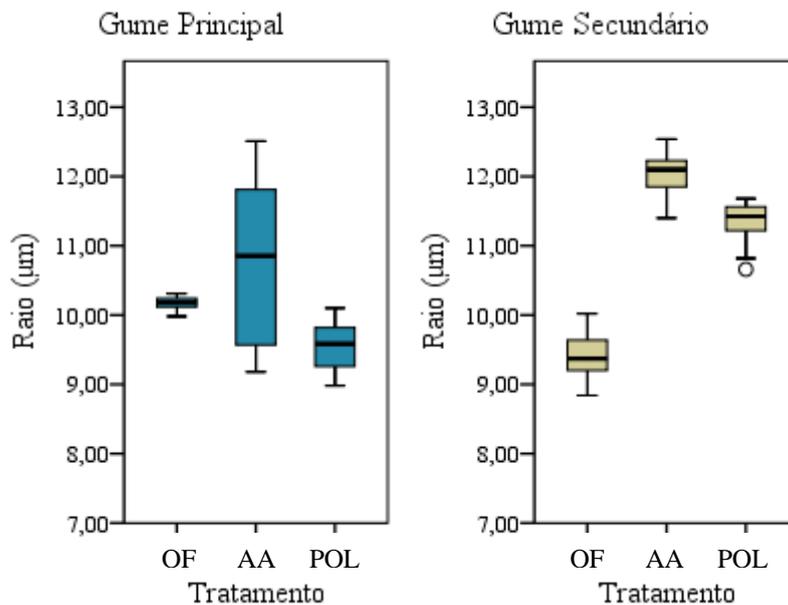


Fonte: O autor, 2016

4.1.3.3 Caracterização microgeométrica

No mesmo equipamento em que foi medida a rugosidade também foram realizadas medições de parâmetros dimensionais de microgeometria das ferramentas. Foram medidas dimensões como raio do gume, fator de forma e tipo de forma. Na figura 27 é apresentado o gráfico da medição de raio de gume nos gumes principal e secundário.

Figura 27 – Valores de raio de gume medidos

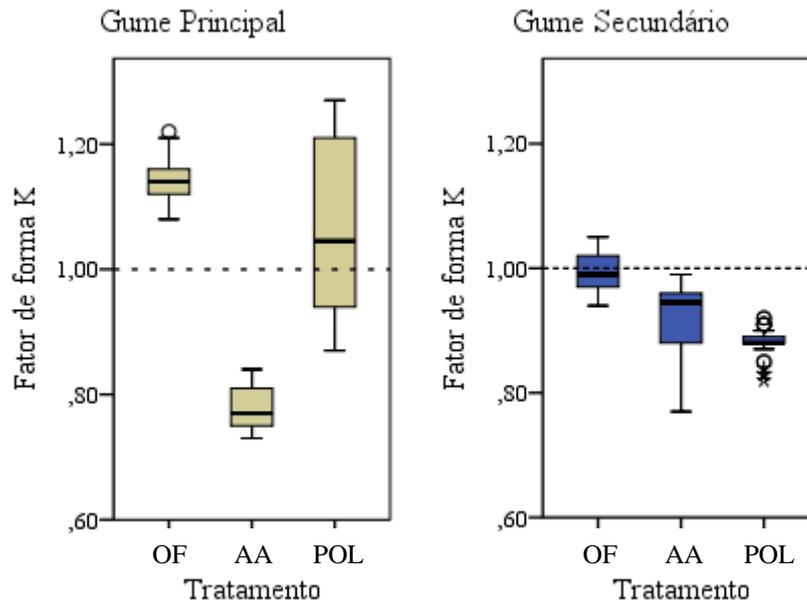


Fonte: O autor, 2016

Os dados apontam que o tratamento age de maneira distinta entre os gumes principal e secundário. Isso provavelmente se dá por causa da orientação dos gumes e do processo. No caso de uma fresa inteiriça, os gumes principal e secundário possuem ângulo de orientação distinta, e são afetados de maneira diferente pelos processos que tem um sentido principal de atuação. No gume secundário houve uma variação mais significativa no raio das ferramentas tratadas. Já no gume principal, o raio não teve tal variação, apenas no caso do tratamento AA, onde houve uma dispersão dos valores. Dessa maneira é possível observar que os tratamentos tiveram uma ação maior sobre o gume secundário, aumentando assim o seu raio. Os tratamentos AA e POL foram aplicados de maneira a atuar principalmente no acabamento superficial das ferramentas, em virtude da sua baixa taxa de remoção. Além do tamanho do raio, é necessário

conhecer também a forma que o gume possui. Na figura 28 são apresentados os fatores de forma K para os gumes tratados.

Figura 28 – Valores do fator de forma K medidos



Fonte: O autor, 2016

No caso do fator de forma, os tratamentos atuaram mais acentuadamente no gume principal, principalmente na ferramenta AA, com fator K da ordem de 0,8. A ferramenta original apresenta um fator $K > 1$. Já a ferramenta POL por sua vez apresentou uma dispersão maior dos valores, mas com tendência de ficar próximo de 1.

Para o gume secundário, a ferramenta original apresentou fator de forma $K=1$ e os tratamentos conseguiram reduzir o fator. Nesta análise se pode observar que é possível, com os tratamentos, mudar o fator de forma K do gume da ferramenta sem uma alteração muito significativa no raio do gume. Os relatórios das medições com o microscópio de foco infinito estão no APÊNDICE A.

A configuração do fator de forma K é determinada através da direção de aplicação do tratamento de gume (BASSET et al. 2012). Como a aplicação do tratamento AA foi apenas no sentido de corte, a ação do abrasivo foi principalmente na face do gume, e por consequência a diminuição do fator K no gume principal. O polimento teve uma ação menor sobre o gume principal, por agir mais no flanco da ferramenta e ser aplicado de maneira contrária ao sentido

de corte. Ambos os tratamentos tiveram uma ação menos acentuada no gume secundário, porém ambos chegaram a valores de $K < 1$.

4.2 Análise da integridade superficial após a usinagem

Nesta seção são apresentados os dados referentes a superfície usinada. A análise inicia com a textura e perfil de rugosidade, obtidos da superfície produzida com a ferramenta nova (INI), e no seu fim de vida (FIM). Em seguida é realizada a análise da rugosidade no sentido de avanço da ferramenta, aqui chamada de rugosidade longitudinal. Também foram medidas as deformações plásticas e dureza por micro endentação.

4.2.1 Análise da Textura e Rugosidade

As análises a seguir são da superfície usinada. Inicialmente é considerada a textura, que funciona como um parâmetro qualitativo, juntamente com o perfil de rugosidade medido naquela região. Em um momento seguinte são mostradas as medidas de alguns parâmetros de rugosidade.

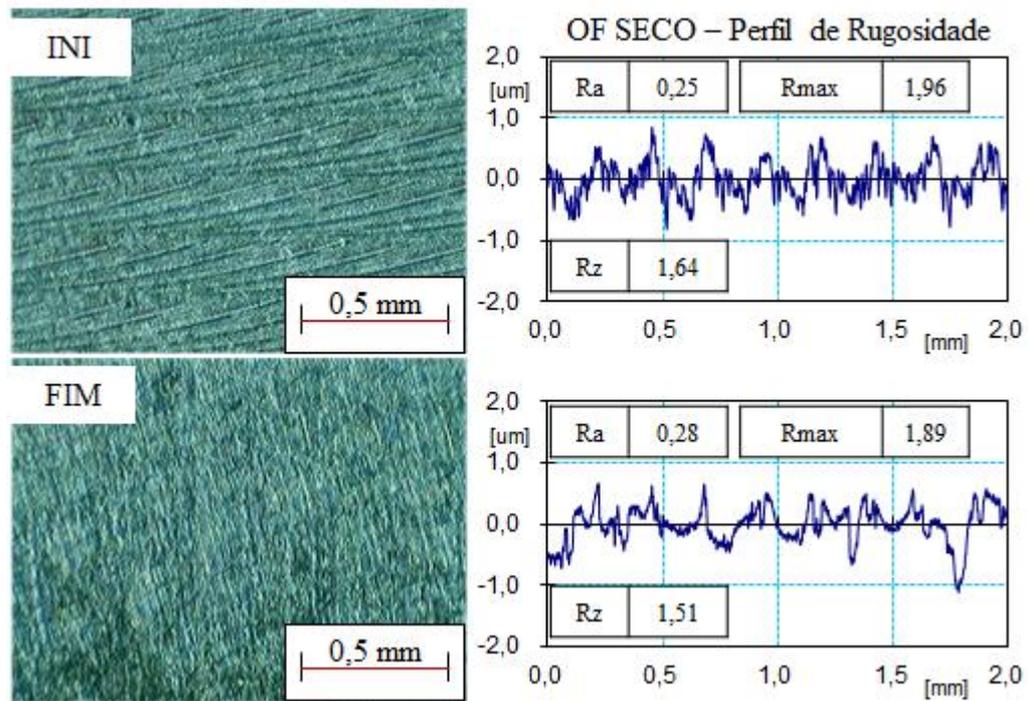
4.2.1.1 Textura e perfil de rugosidade

Para realizar uma comparação das superfícies, são apresentados dados quantitativos como também qualitativos. São mostradas as texturas de início, produzida com a ferramenta nova, e fim, com a ferramenta desgastada. Para cada condição testada é exibido também um trecho do perfil de rugosidade medido e os parâmetros R_a , R_z e R_{max} da medição em $[\mu m]$. Na figura 29 são apresentados textura e perfil de rugosidade para a condição (OF SECO).

Na condição (OF SECO) a superfície de início possui marcas bem definidas da passagem da ferramenta, assim como um perfil de rugosidade onde há um padrão que se repete linearmente. Já na superfície obtida para a ferramenta em situação de fim de vida, se tem ausência de marcas definidas decorrentes da passagem da ferramenta decorrentes da degradação do gume. Além disso, apesar dos valores de rugosidade apresentarem pouca mudança, o perfil de rugosidade mostra um padrão irregular.

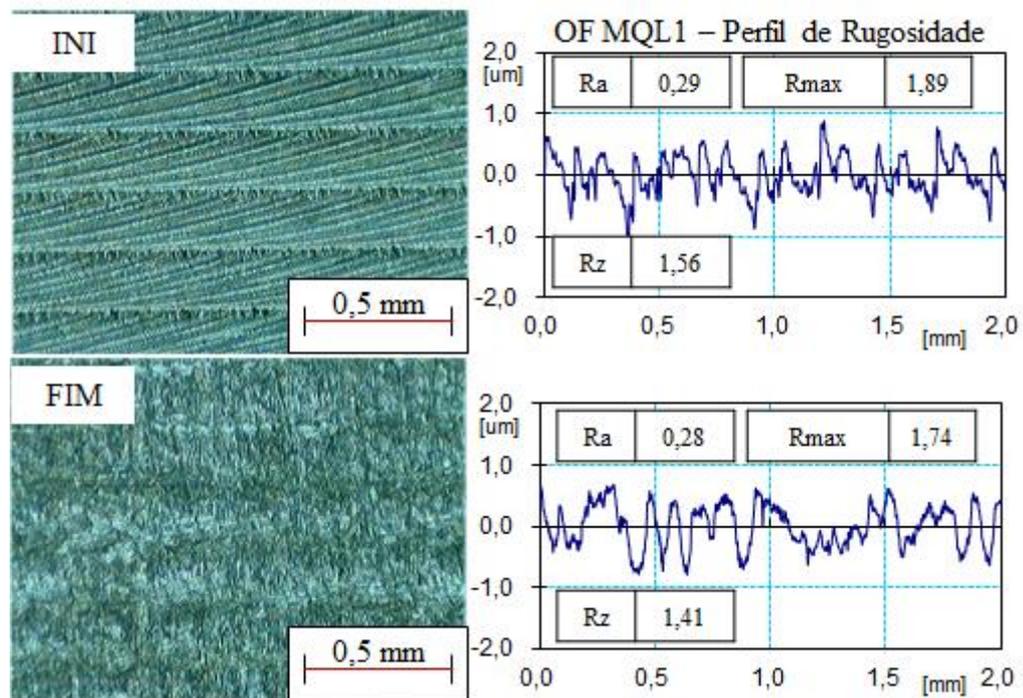
Com a inserção da aplicação de fluido, alterações na textura são bem aparentes. A figura 30 traz a textura proveniente da configuração (OF MQL1).

Figura 29 – Textura e perfil de rugosidade da condição OF SECO



Fonte: O autor, 2016

Figura 30 – Textura e perfil de rugosidade da condição OF MQL1

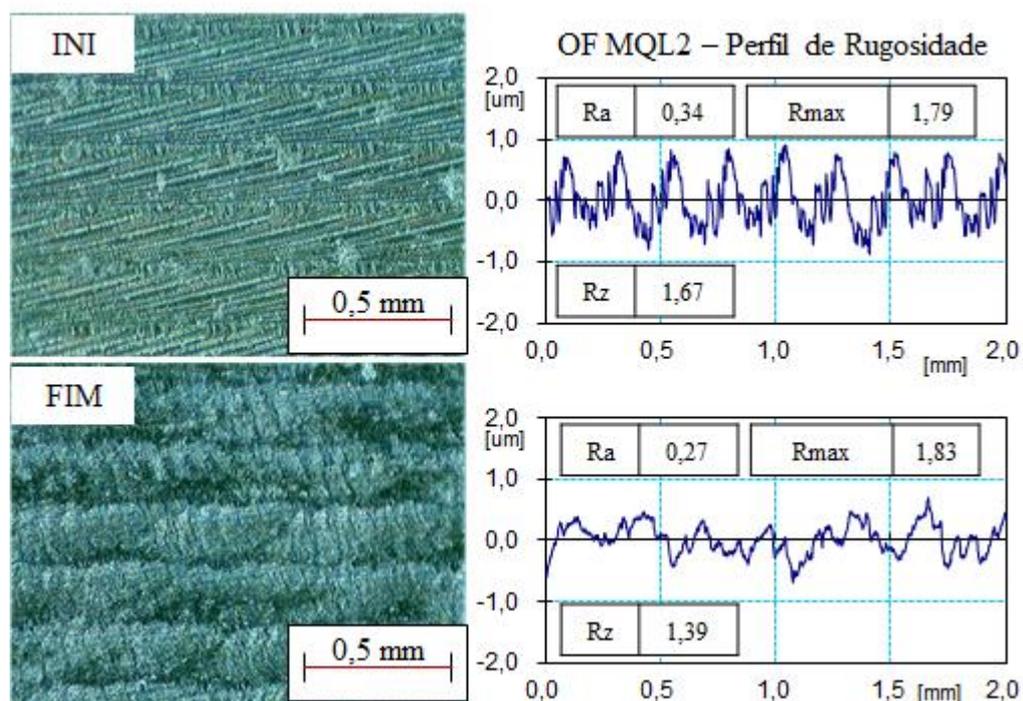


Fonte: O autor, 2016

Novamente no início da vida a ferramenta produz uma superfície com as marcas da passagem da ferramenta bem definidas. Apesar dos parâmetros medidos serem bem próximos, o perfil da rugosidade apresenta diferenças, com um perfil mais irregular no fim de vida. A textura no fim de vida, apesar da visível irregularidade, ainda é possível distinguir as marcas horizontais da passagem da ferramenta.

É feita também a comparação da textura e perfil na condição (OF MQL2). Esta é mostrada na figura 31.

Figura 31 – Textura e perfil de rugosidade da condição OF MQL2



Fonte: O autor, 2016

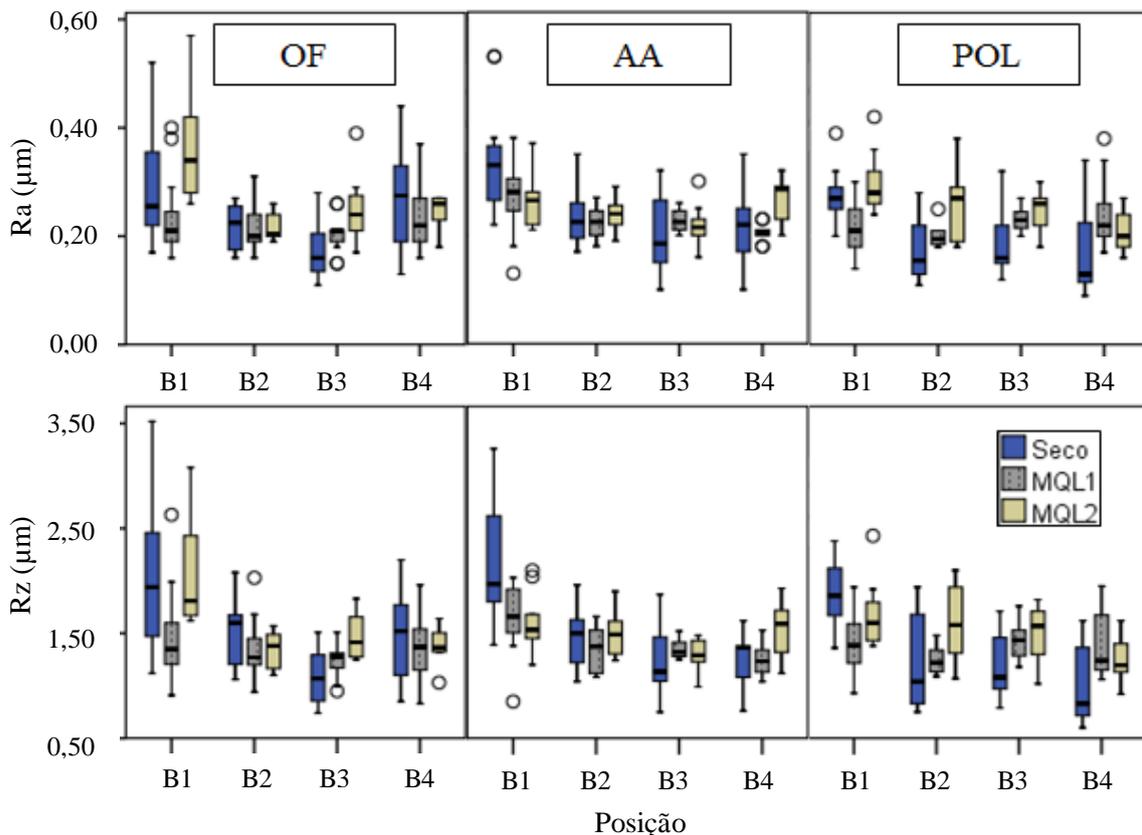
Na condição (OF MQL2) se tem uma variação mais significativa tanto na textura como na rugosidade juntamente com seu perfil. Nesta condição houve uma diminuição dos parâmetros de rugosidade do início para o fim de vida da ferramenta. Da mesma forma, Zeilmann et al. (2013), constataram uma variação similar da textura para uma fresa em fim de vida. Os autores não constataram diferenças na superfície de fim de vida decorrente do tratamento de gume. Não houve variação significativa da textura entre os tratamentos no presente trabalho. Isto pode estar ligado ao raio de gume que é semelhante entre as ferramentas. Raios de gume com variações maiores podem produzir marcas mais ou menos aparentes. Os demais comportamentos de textura são apresentados no APÊNDICE C.

4.2.1.2 Medição de rugosidade

Como explicado anteriormente, a análise aqui apresentada é da rugosidade longitudinal, realizada nas quatro superfícies do corpo de prova B. Cada superfície corresponde a um momento durante a vida da ferramenta. A primeira região (B1) corresponde a ferramenta nova. A segunda região corresponde a ferramenta após usinar 8,8 m (B2). A terceira região (B3) corresponde a ferramenta após usinar 16,5 m no corpo de prova A. Por fim, a região que corresponde a ferramenta ao atingir o desgaste V_{Bmax} de 0,2 mm (B4). Esta última região não está ligada a um comprimento de corte fixo.

Em cada região foram realizadas uma série de medições de rugosidade, as medições foram realizadas nas superfícies do teste e da réplica. Na figura 32 são apresentados os gráficos da rugosidade R_a e R_z .

Figura 32 – Valores de R_a e R_z medidos



Fonte: O autor, 2016

Em um primeiro momento é possível observar que a rugosidade tende a ser mais elevada no início do processo. A rugosidade maior no início do corte é algo esperado, conforme

aponta König (1997), sobre o critério da qualidade superficial. Esta tendência apenas não é observada nas condições (OF MQL1) e (POL MQL1). Além disso, a usinagem a seco apresentou as maiores dispersões nos dados, e a aplicação de MQL1 apresentou a menor dispersão. Apesar da dispersão, os valores de rugosidade nas ferramentas que usinaram a seco ficaram entre as mais baixas, com a condição (POL SECO) apresentando as menores medianas de rugosidade, a partir da posição B2. Para o início do processo a ferramenta OF apresentou as maiores rugosidades, nas condições (OF SECO) e (OF MQL2).

Em se tratando de rugosidade, o que se deseja nem sempre é a menor rugosidade, mas sim uma estabilidade deste parâmetro ao longo da vida da ferramenta. Com isto em vista, é possível observar que a aplicação de fluido tende a aumentar a estabilidade da rugosidade. Especialmente o (MQL1) se mostrou estável com os diferentes tratamentos. A ferramenta AA se mostrou a mais estável entre os tratamentos, principalmente nas posições B2 e B3.

O teste estatístico de análise de variância (ANOVA) vem confirmar a existência de influência de cada fator sobre rugosidade. Os fatores analisados são: Posição (A) – B1, B2, B3 e B4, Tratamento (B) – OF, AA e POL e Condição (C) – Seco, MQL1 e MQL2. Nas tabelas 5 e 6 são apresentadas as ANOVAs para os parâmetros R_a e R_z .

A análise de variância com significância α de 5% aponta que os fatores posição (A) e condição (C) tem influência sobre a rugosidade R_a e R_z mesmo individualmente. Da mesma forma a interação entre os dois (A*C) e entre os três fatores (A*B*C) apresentaram influência sobre os dois parâmetros. A interação (B*C) mostrou ter influência no parâmetro R_a .

Estudos já realizados corroboram com estes comportamentos. Fulemová et al. (2014) e (2015) testaram diferentes raios de ferramentas e fatores de forma K no fresamento de aço EN ISO X12CrMoVNB9-1 com insertos do tipo *wiper*. Chegou à conclusão que o raio de gume de 15 μm obtido por acabamento por arraste, juntamente com fator de forma $K=0,5$, produziram melhores resultados tanto na vida da ferramenta quanto na qualidade superficial obtida.

Quanto à significância da condição, o estudo de Li e Chou (2010) aponta que o uso de MQL no fresamento deixou a rugosidade mais estável ao longo da vida da ferramenta, em comparação com a condição a seco. Além disso, o parâmetro R_{max} longitudinal, e R_z e R_{max} transversais também apontam a influência da interação condição com tratamento. Os dados e análise estatística destes parâmetros estão no APÊNDICE D.

Tabela 5 – ANOVA dos valores de R_a

Fonte	Soma Quadrática	gl	Média Quadrática	F	Sig.
A	,297	3	,099	24,972	,000
B	,024	2	,012	2,964	,053
C	,065	2	,033	8,251	,000
A*B	,031	6	,005	1,299	,257
A*C	,107	6	,018	4,482	,000
B*C	,039	4	,010	2,455	,046
A*B*C	,117	12	,010	2,452	,004
Erro	1,361	343	,004		
Total	2,066	378			

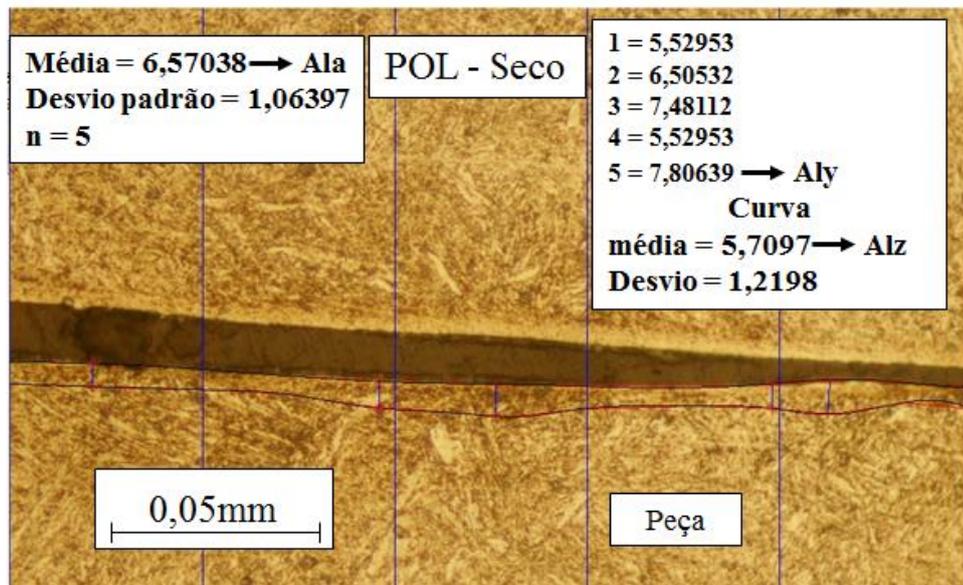
Tabela 6 – ANOVA dos valores de R_z

Fonte	Soma Quadrática	gl	Média Quadrática	F	Sig.
A	13,915	3	4,638	40,643	,000
B	,527	2	,264	2,311	,101
C	1,248	2	,624	5,467	,005
A*B	1,033	6	,172	1,509	,174
A*C	5,330	6	,888	7,784	,000
B*C	,877	4	,219	1,922	,106
A*B*C	2,623	12	,219	1,916	,032
Erro	39,144	343	,114		
Total	65,781	378			

4.2.2 Análise das deformações plásticas e dureza por micro indentação

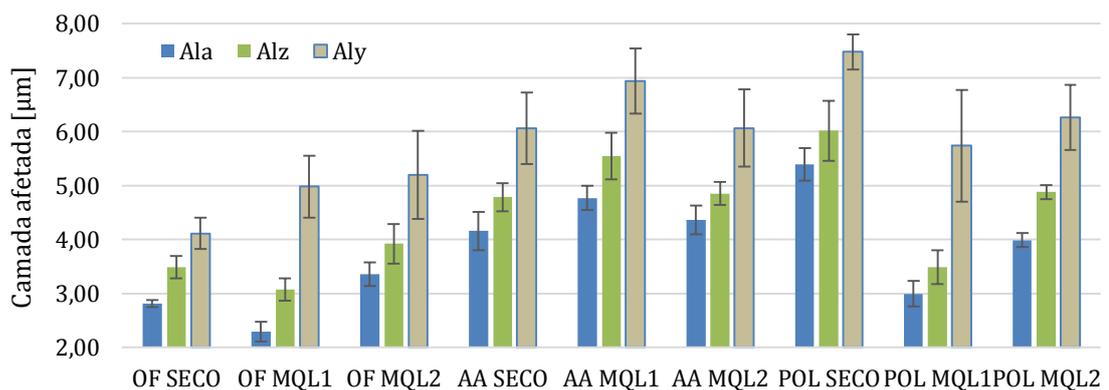
Para análise de deformações plásticas e dureza, foi escolhida a superfície com 8,8 m usinados (B2). A superfície foi seccionada transversalmente ao sentido de avanço e realizada a metalografia. A amostra de cada seção foi embutida e recebeu polimento, e um posterior ataque químico com solução de Nital 2% para revelar a sua microestrutura. Foram então capturadas imagens da estrutura do material, com aumento de 500x para posterior medição das deformações. As imagens tiveram suas deformações, ou camada afetada, medidos através do *software* Imagine. A figura 33 mostra um exemplo de medição realizado nas análises.

Figura 33 – Exemplo de medição de camada afetada



Fonte: O autor, 2016

O resultado das medições é apresentado na figura 34. Os parâmetros medidos são Al_a , que consiste em uma profundidade média de deformação, Al_z , que é uma média dos cinco maiores picos de profundidade, e Al_y , que é o maior pico de profundidade.

Figura 34 – Gráfico da camada afetada Al_a , Al_z e Al_y medidos

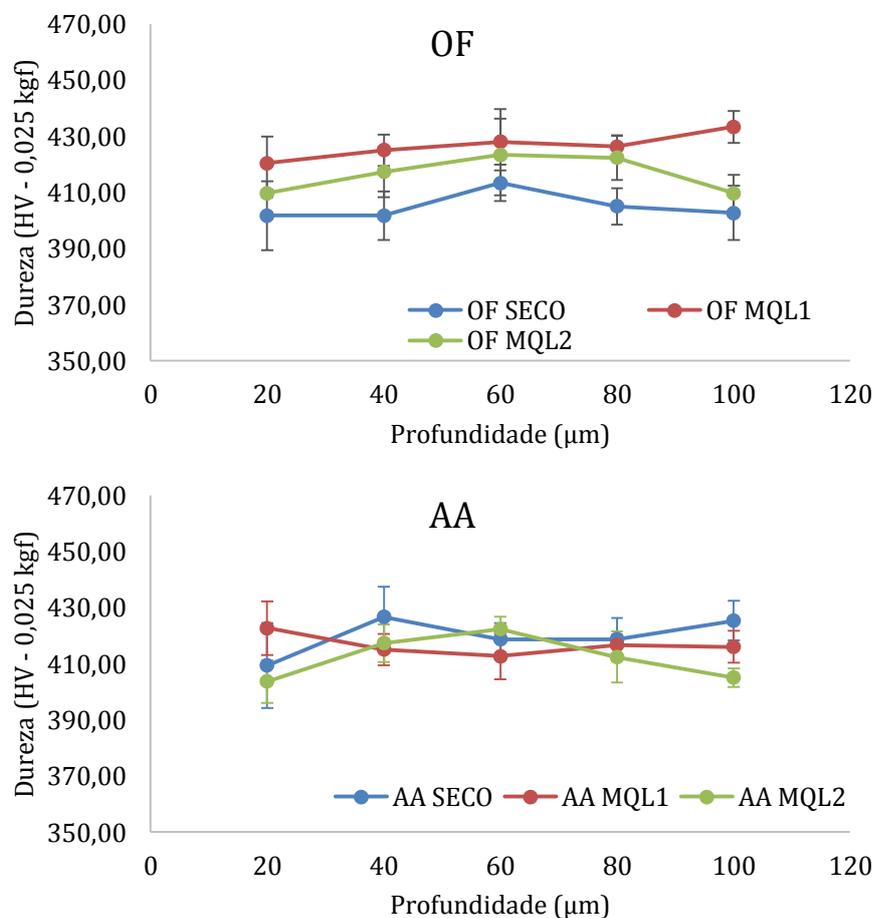
Fonte: O autor, 2016

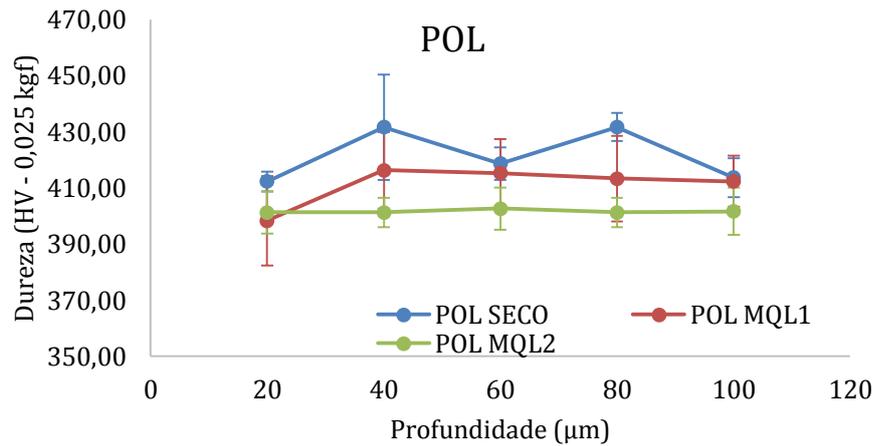
Apesar das variações visíveis na figura 34, é necessário ressaltar que a medição por meio do *software* Imagine possui maior incerteza para deformações menores que 10 µm. Apesar da precisão das medições ser limitada para a faixa de deformação observada, as condições (OF - Todas) e (POL MQL1) tendem a apresentar as menores deformações.

Segundo Denkena et al. (2012), existe uma correlação entre as forças do processo de usinagem, com o material deformado e as tensões residuais. Segundo o mesmo, esta relação pode ser aplicada para diferentes microgeometrias de gume, caracterizando as cargas e a subsuperfície gerada. Isto pode explicar o aumento da camada afetada nas superfícies usinadas com ferramentas tratadas. Por outro lado, no fresamento de um aço ABNT P20 com fresas de HSS topo reto, Zeilmann et al. (2013) verificaram que a camada afetada foi menor para ferramentas novas com tratamento de gume. Esse comportamento foi atribuído pelos autores, à melhor distribuição das solicitações sobre o gume arredondando, levando a uma menor geração de atrito e calor e, conseqüentemente, das deformações plásticas.

Por sua vez as medições de perfil de dureza foram realizadas para as mesmas amostras (B2) e seus comportamentos são apresentados na figura 35. As medições foram realizadas conforme a norma pertinente (NBR NM ISO 6507-1), respeitando a distância de 20 μm da borda para a primeira medição. As demais medições foram realizadas com distância de 20 μm entre si, e a carga utilizada na endentação foi de 0,025 kgf.

Figura 35 – Perfis de dureza medidos.





Fonte: O autor, 2016

Pelo fato da medição iniciar na profundidade de 20 μm por limitação da norma, não é captada nenhuma alteração aparente no material, sendo que as deformações plásticas medidas anteriormente são da ordem de 8 μm. Sendo assim, todas as medições apresentam apenas a dureza do material base, sem alterações provenientes do processo estudado.

Em se tratando da relação da integridade na usinagem com o estado de dureza subsuperficial e as tensões no material, alguns trabalhos foram publicados. Devillez et al. (2011), ao realizar torneamento de uma liga de Inconel 718 observou que o perfil de dureza por microindentação obtido foi maior para as condições com maiores deformações. As profundidades de deformações coincidiram com a região aonde a dureza mensurada se aproximava do material base. Ainda realizaram uma relação da dureza superficial com as tensões residuais presentes.

Denkena et al. (2012), em um trabalho sobre o raio e a forma do gume no fresamento do aço 42CrMo4, observou a influência do tratamento de gume e sua forma no desgaste, forças de corte e tensões residuais. Este definiu a existência de correlações entre a espessura média do cavaco, as forças de corte e as tensões residuais no material.

4.3 Comportamento de desgaste

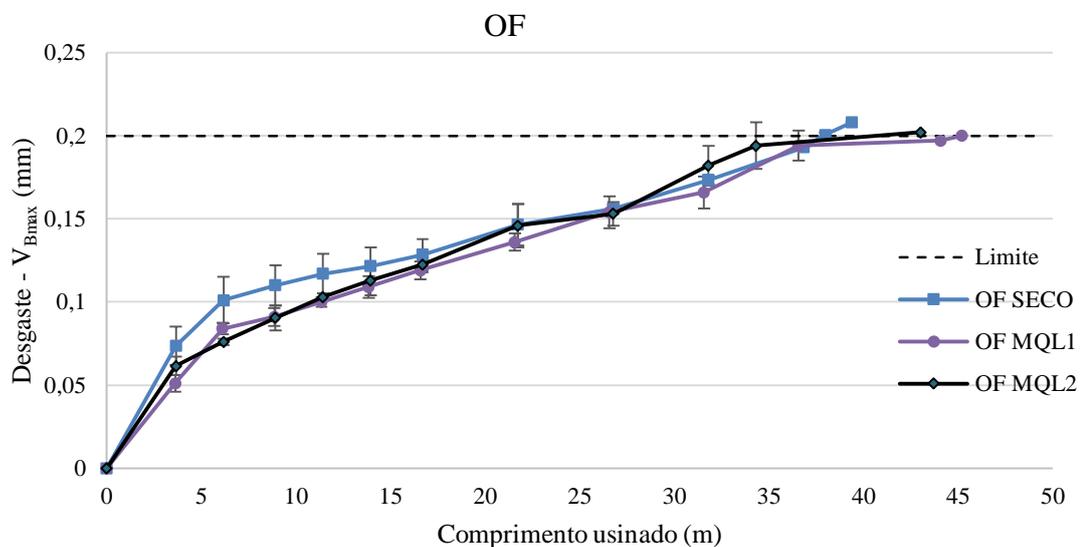
Nesta seção são apresentados os dados de desgaste das fresas utilizadas neste trabalho. São apresentadas as curvas de vida relacionadas ao comprimento usinado para cada condição.

4.3.1 Curvas de desgaste

Inicialmente foram geradas as curvas de vida, onde o desgaste foi medido ao longo da usinagem, em diversos pontos. As curvas são resultantes de um teste e sua réplica. Na condição (OF MQL1) houve uma tréplica. Na figura 36, 37 e 38 são apresentadas as curvas de vida, onde o ensaio foi conduzido até a ferramenta apresentar um desgaste V_{Bmax} de 0,2 mm. Os primeiros três gráficos estão separados por tratamento (OF – AA – POL). Cada gráfico possui as curvas para as três condições testadas (SECO – MQL1 – MQL2).

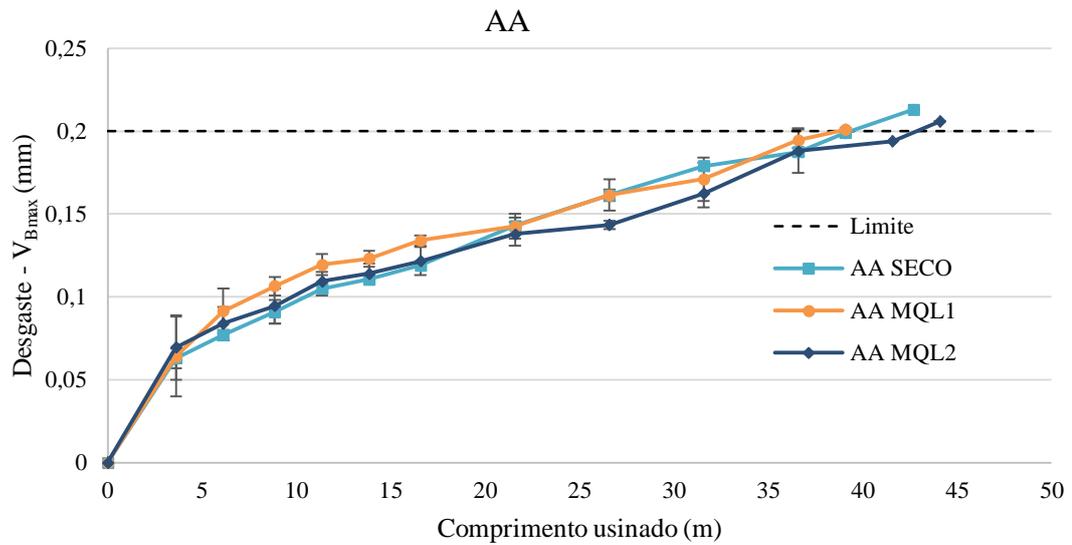
Todas as curvas apresentam como característica o início acentuado, seguido de um crescimento estável próximo de ser linear como apresentado por Machado et al. (2009) na figura 13. Nenhuma curva entrou no estágio III de desgaste. Na condição original (OF) é possível observar um efeito positivo sobre a vida com o uso de MQL (MQL1 e MQL2), em comparação com a usinagem a seco (SECO).

Figura 36 – Comportamentos de desgaste das ferramentas OF



Fonte: O autor, 2016

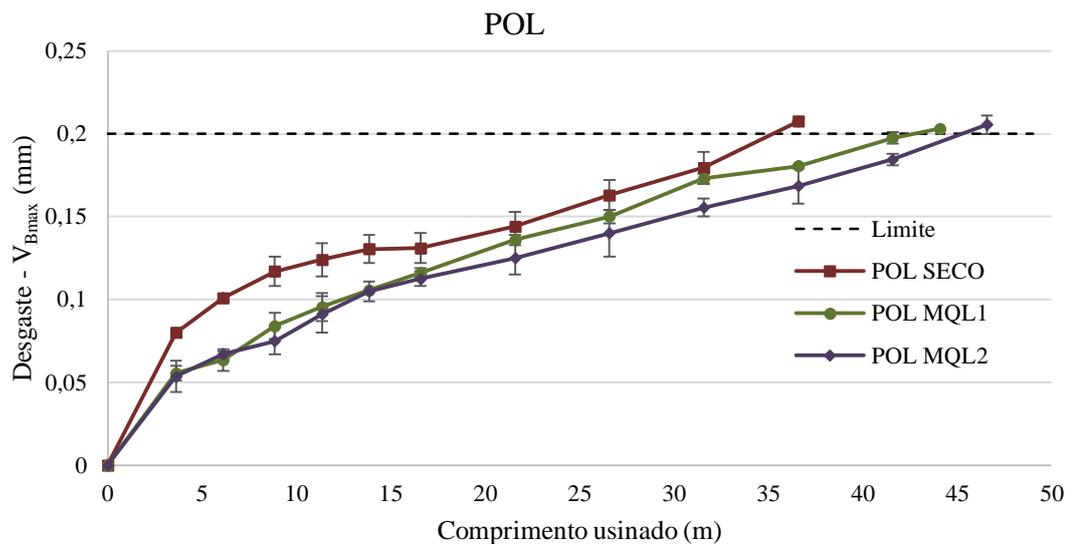
Figura 37 – Comportamentos de desgaste das ferramentas AA



Fonte: O autor, 2016

Na ferramenta com acabamento por arraste (AA), as curvas tiveram comportamentos muito semelhantes, com (MQL2) apresentando uma mínima vantagem sobre os demais. A ferramenta polida (POL) apresentou as maiores diferenças com aplicação de MQL. Apresentou a pior curva entre todos os testes realizados na condição (POL SECO), e as melhores curvas nas condições (POL MQL1 e POL MQL2).

Figura 38 – Comportamentos de desgaste das ferramentas POL



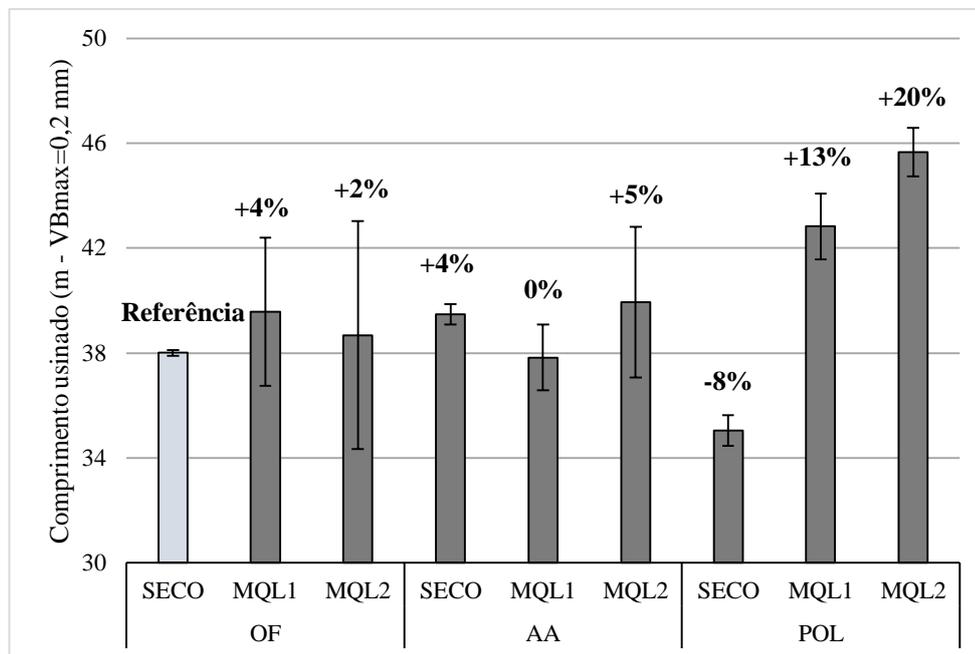
Fonte: O autor, 2016

Na usinagem a seco (SECO) as ferramentas (OF) e (AA) apresentaram um desempenho muito próximo, sendo ambas superiores à ferramenta (POL). Na aplicação de (MQL1), a ferramenta (POL) teve um desempenho ligeiramente superior. A ferramenta (OF) teve um desempenho próximo no primeiro teste, porém na réplica teve um resultado inferior. Por fim, na aplicação de (MQL2) a ferramenta (POL) se destacou das demais, com o teste e réplica apresentando bons resultados. No APÊNDICE E estão as curvas de desgaste divididas por condição.

A figura 39 apresenta um comparativo do comprimento de corte médio usinado pelas ferramentas, e faz uma relação utilizando a condição (OF SECO) como referência. O gráfico realiza uma comparação percentual destas médias. Como nem sempre foi possível interromper o teste com desgaste de exatamente 0,2 mm, os valores de comprimento de corte sofreram uma interpolação linear para o valor de 0,2 mm de desgaste.

A condição (OF SECO) foi escolhida por ser a primeira escolha para usinagem deste tipo e por ter sido a condição com a menor variação entre o teste e a réplica. Na comparação, apenas a condição (POL SECO) apresentou um desempenho inferior (menos 8%) comparando as médias.

Figura 39 – Comprimento usinado por condição



Fonte: O autor, 2016

As condições (POL MQL1) e (POL MQL2) apresentaram bons resultados com 13% e 20% a mais em comprimento usinado respectivamente. As demais condições ficaram com

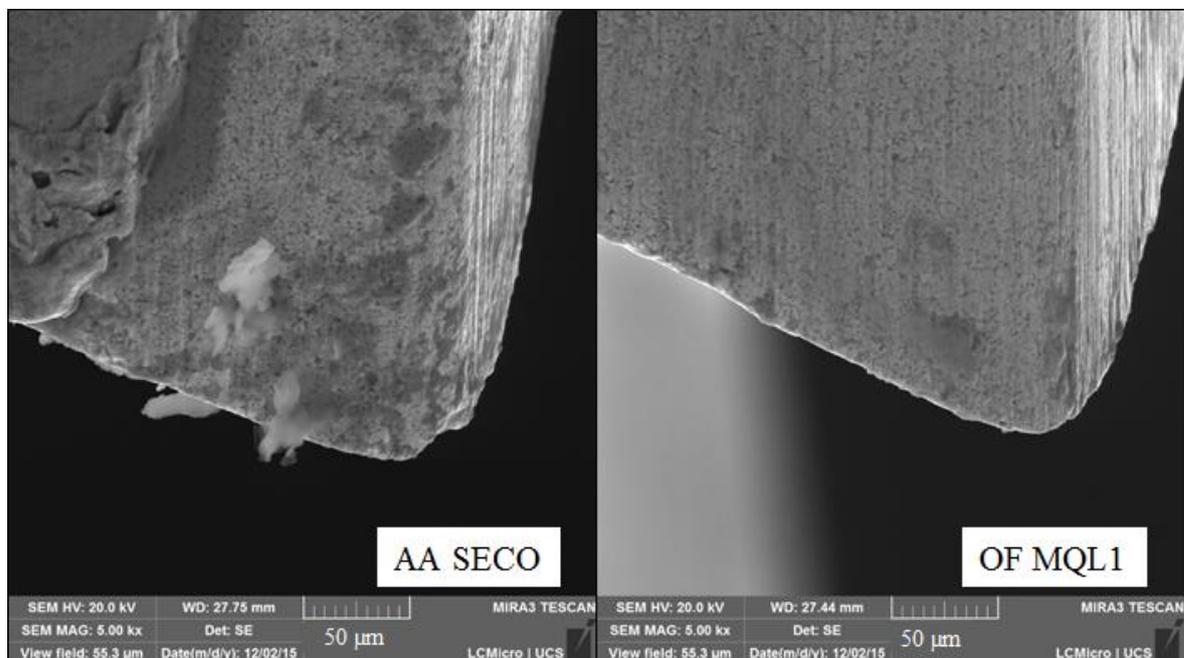
valores ligeiramente próximos ou superiores (0% a +5%). As condições (OF MQL1 e MQL2) e (AA MQL2) apresentaram as maiores incertezas. Para estes casos não foi possível uma réplica por motivo de disponibilidade de ferramentas.

Na análise realizada por Bouzakis et al. (2014), o polimento de pastilhas de fresamento conseguiu chegar a uma melhora no comprimento usinado para a liga Ti6Al4V, aumentando a vida em 62% comparando com a ferramenta original. A operação de acabamento por arraste conseguiu aumento de 41% para a mesma liga, e 34% para Inconel 718. Os autores ainda testaram os tratamentos no fresamento de Aço 42CrMo4 e aço inoxidável AISI 304L, onde os tratamentos não apresentaram um ganho no comprimento usinado.

4.3.2 Caracterização dos mecanismos de desgaste

Para identificar quais os tipos de desgaste predominantes no processo, foi realizada uma análise do desgaste. Aparentemente os mecanismo de desgaste mais presentes foram a abrasão e adesão. Como resultado se tem marcas de desgaste que podem ser observadas na figura 40, com marcas verticais de desgaste e material aderido.

Figura 40 – Desgaste nas ferramentas



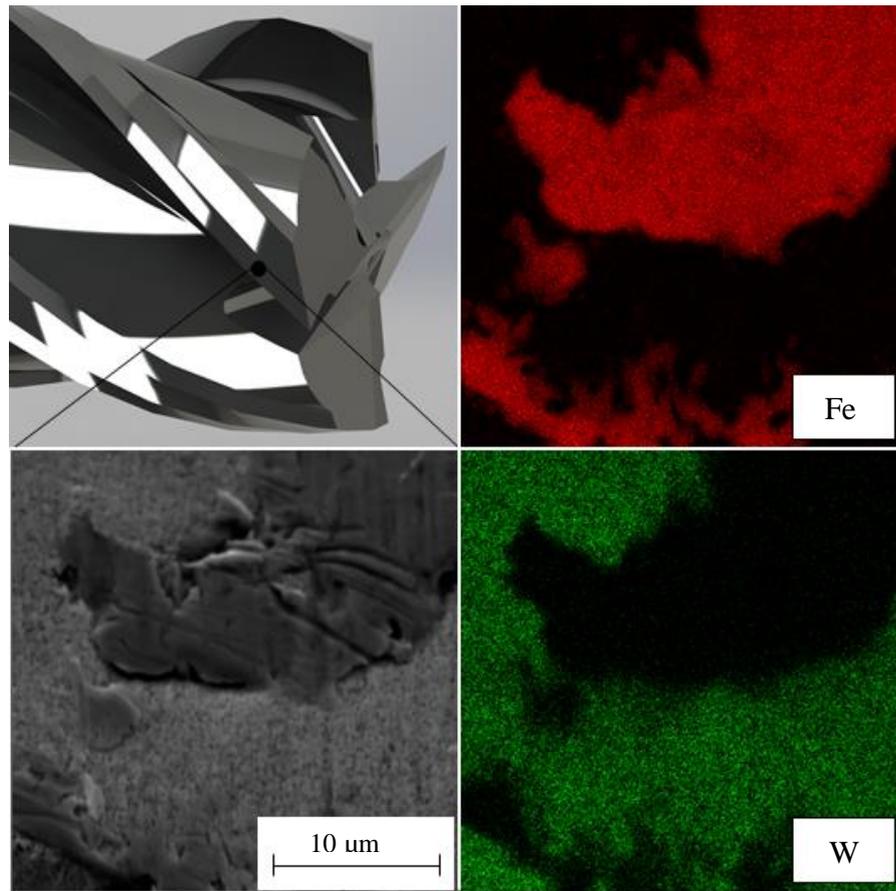
Fonte: O autor, 2016

A maneira como o desgaste aparece é similar para todas as condições testadas. Além dos mecanismos já citados, também houve incidência de micro lascamentos. A adesão foi confirmada por meio de EDS, a figura 41 traz uma amostra da ferramenta (OF MQL2) que diferencia o material aderido do material base da ferramenta.

A partir de uma região da face retratada a esquerda, no canto superior direito aparece o material aderido, representado pelo elemento ferro (Fe) destacado em vermelho. No canto inferior esquerdo o elemento tungstênio (W) em verde representa o material base da ferramenta. Se sabe que a ferramenta de metal duro tem tungstênio como um de seus principais componentes. Por outro lado, a peça é formada primariamente pelo elemento ferro. Na figura 42 estão ilustrados alguns casos de desgaste, em imagens por MEV.

As análises foram feitas em todas as ferramentas. As imagens de microscopia eletrônica foram feitas de apenas um gume, para cada condição. O aspecto que diferencia as condições testadas, é que na condição (SECO) a quantidade de material aderido na ferramenta foi maior, indiferente do tratamento de gume. Fato que se deve a lubrificação da superfície pelo MQL que por produzir um filme de fluido na ferramenta, consegue diminuir o material que acaba aderido.

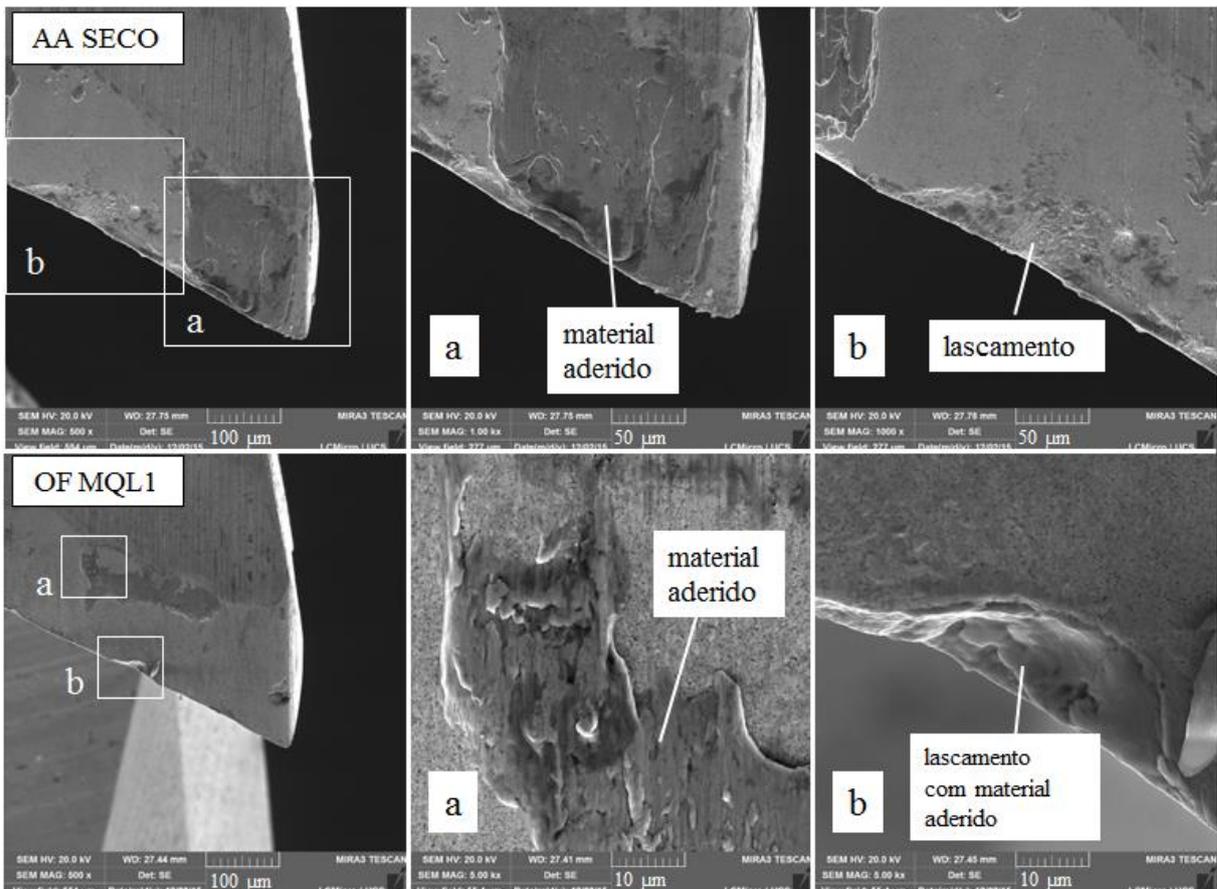
Figura 41 – EDS da face da ferramenta (OF – MQL2) com adesão



Fonte: O autor, 2016

A condição com a menor vida (POL SECO) é mostrada na figura 43 (a). Na mesma imagem, é apresentada a ferramenta da condição (POL MQL2) (b), onde é possível observar a textura deixada pelo material arrancado pelo processo de adesão. A diminuição da vida da ferramenta na condição (POL SECO) pode estar ligada a uma ação mais acentuada da adesão. De acordo com Silva et al. (2013), o fenômeno de adesão quando não relacionado a baixas velocidades de corte, pode estar ligado a operações com corte intermitente. Segundo os mesmos autores, o material que adere é removido em seguida, levando consigo partículas arrancadas da ferramenta. Este fenômeno produz uma textura áspera nos locais onde o material foi arrancado. A adesão mais proeminente pode estar ligada a rugosidade da ferramenta polida. Na seção 4.2.3.2, figura 25, onde são apresentadas as rugosidades nos gumes, a ferramenta (POL) possui os valores mais altos. Este pode ser um fator que facilitou a adesão de material durante a usinagem.

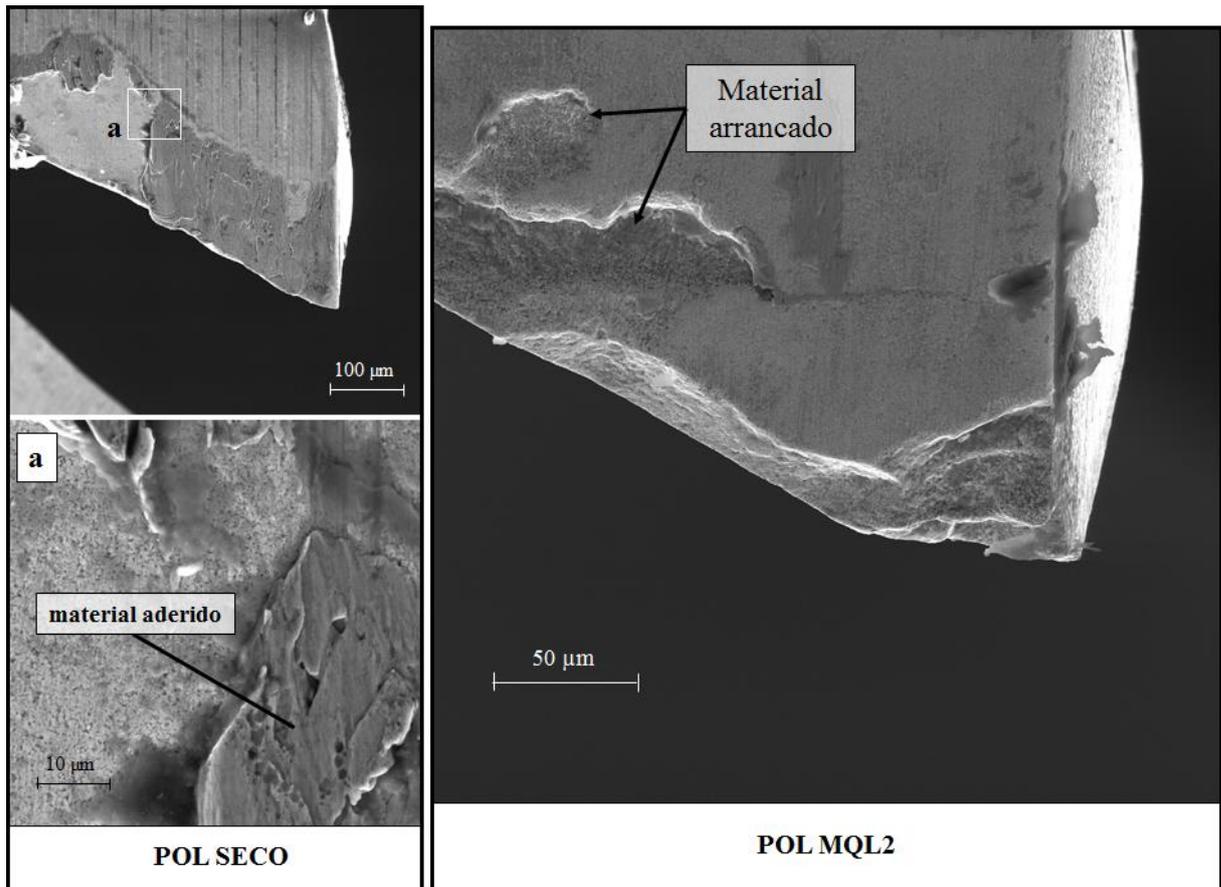
Figura 42 – MEV de algumas ferramentas com desgaste



Fonte: O autor, 2016

Quanto a utilização de MQL, Liu et al. (2013) constatou a diminuição de micro lascamentos com o seu uso, assim como a diminuição do material aderido em operação de torneamento. Em testes de fresamento realizados por Li e Chou (2010), o uso de MQL diminuiu o desgaste de flanco e a formação de rebarbas na usinagem de aço SKD 61, comparando com o processo à seco. A utilização de MQL diminuiu o desgaste nos ensaios de fresamento de liga de alumínio de Kishawy et al. (2005) em comparação com o processo a seco e com emulsão. Nos ensaios de Silva et al. (2011) no fresamento de aço AISI 1047 a utilização de MQL não mostrou bons resultados em comparação com o processo à seco e com emulsão, com a menor taxa de remoção de material. O uso de MQL no fresamento em operações de acabamento com altas velocidades de corte tem mostrado bom desempenho (SHARMA et al. 2016).

Figura 43 – MEV da ferramenta POL - SECO com desgaste



Fonte: O autor, 2016

5. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho contribuíram para a melhor compreensão sobre os tratamentos realizados em ferramentas, seu impacto na usinagem e sua interação com fluidos.

A caracterização das ferramentas proporcionou a visualização do resultado do tratamento na superfície das ferramentas. Além disso, as medições realizadas tornaram possível um comparativo dimensional de parâmetros como raio, fator de forma e rugosidade das ferramentas. Dentre os acabamentos analisados, a ferramenta AA demonstrou uma superfície da ferramenta mais homogênea. Ambos os tratamentos mostraram também que tem ação distinta nos gumes principal e secundário. Os tratamentos agiram mais sobre o raio no gume secundário, e sobre o fator de forma no gume principal. A ferramenta POL apresentou valores elevados de rugosidade em seu gume principal.

As medições de rugosidade ao longo da vida da ferramenta mostraram que a ferramenta tratada AA, seguida da ferramenta POL, tiveram os parâmetros de rugosidade mais estáveis principalmente com aplicação de MQL. A análise estatística realizada também aponta a influência dos tratamentos e da aplicação de MQL sobre os parâmetros Ra, Rz e Rmax. Além disso a análise aponta que a interação entre tratamentos e aplicação de fluido tem influência sobre a rugosidade.

A análise da camada afetada mostrou que a ferramenta POL na condição a seco obteve as maiores deformações. As menores deformações foram obtidas pela ferramenta OF na condição a seco. Para todas as ferramentas AA e as ferramentas POL que usinaram a seco e com MQL2, o raio maior no gume secundário contribuiu para o aumento da camada afetada.

Quanto ao desgaste, todas as ferramentas tiveram um comportamento semelhante. Aparentemente os mecanismos de desgaste mais presentes foram a abrasão e a adesão, apresentando como características o desgaste de flanco e suas marcas de abrasividade verticais, e a textura gerada pelo material aderido arrancado. Os melhores resultados de vida da ferramenta em termos de comprimento usinado foram obtidos pelas ferramentas POL com aplicação de MQL. Por outro lado, os piores resultados são das ferramentas POL que usinaram a seco. Apesar de ser um tratamento aplicado de maneira simples, o polimento mostrou ter potencial, e deve alcançar bons resultados, se aprimorado.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar os parâmetros do polimento por cerdas abrasivas e seu desgaste, utilizando outros materiais para realizar o polimento.

Avaliar a mídia do acabamento por arraste, produzir uma mídia alternativa e fazer uma comparação com a comercial.

Avaliação das tensões residuais da superfície geradas por ferramentas com diferentes tratamentos de superfície.

Realizar medições de dureza próximas da borda do material, com escalas nanométricas, a fim de verificar a relação da dureza com as deformações plásticas e se há variação com as ferramentas tratadas.

REFERÊNCIAS

- AURICH J. C., EFFGEN C., Influence of the machining conditions when preparing cutting edges with elastic bonded grinding wheels. *Production Engineering. Research and Development*, 9:329–336, 2015.
- BASSETT E., KÖHLER J., DENKENA B., On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5:108–126, 2012.
- BET L., *Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e sondas ópticas tipo seguidor*, Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 243p, 1999.
- BIERLA A., FROMENTIN G., MINFRAY C., MARTIN J., LE MOGNE T., GENET N., Mechanical and physico-chemical study of sulfur additives effect in milling of high strength steel. *Wear*, 286–287:116–123, 2012.
- BIERMANN D., TERWEY I., Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1:76–80, 2008.
- BORDIN F. M., *Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, RS, 128p, 2013.
- BORDIN F.M., ZEILMANN R. P., Effect of the cutting edge preparation on the surface integrity after dry drilling. *Procedia CIRP*, 13:103–107, 2014.
- BOUZAKIS K.D., BOUZAKIS E., KOMBOGIANNIS S., et al. Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7:264–273, 2014.
- BRALLA J. G., *Handbook of Manufacturing Processes*. Industrial Press, 2007.
- BYERS J. P., *Metalworking Fluids*. Taylor & Francis, 2006.
- CETIN M. H., OZCELIK B., KURAM E., DEMIRBAS E., Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 7:2049–2056, 2011.
- DAVIM J. P., *Surface Integrity in Machining*. Springer, 2010.

- DENKENA B., KOEHLER J., REHE M., Influence of the Honed Cutting Edge on Tool Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel. *Procedia CIRP*, 1:190–195, 2012.
- DENKENA B., BIERMANN D., Cutting edge geometries. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 63:631–653, 2014.
- DEVILLEZ A., LE COZ G., DOMINIAK S., DUDZINSKI D., Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 211:1590-1598, 2011.
- DINIZ A. E., MARCONDES F. C., COPPINI N. L., Tecnologia da Usinagem dos Materiais. MM Editora. 1999.
- FERRARESI D., Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: E. Blucher, 3v, 1970.
- FULEMOVÁ J., JANDA Z., Influence of the Cutting Edge Radius and the Cutting Edge Preparation on Tool Life and Cutting Forces at Inserts with Wiper Geometry. *Procedia Engineering*, 69:565–573, 2014.
- FULEMOVÁ J., REHOR J., Influence of form factor of the cutting edge on tool life during finishing milling. *Procedia Engineering*, 100:682–688, 2015.
- JAVIDI A., RIEGER U., EICHLSEDER W., The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue*, 30: 10–11:2050–2055, 2008.
- KALPAKJIAN S., SCHMID S. R., Manufacturing Engineering and Technology. Sixth edition. Pearson. 2009.
- KEDARE S. B., BORSE D. R., SHAHANE P. T., Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Surface Roughness of Mild Steel of 15HRC on Universal Milling Machine. *Procedia Materials Science*, 6:150–153, 2014.
- KISHAWY H. A., DUMITRESCU M., NG E. –G., ELBESTAWI M.A., Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45–2:219–227, 2005.
- KLOCKE F., Manufacturing Processes 1 – Cutting. Springer, 2011.
- KÖNIG W., Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren. Dusseldorf, VDI – Verlag, 471p. 1997.

- LI K., CHOU S., Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 210:2163–2170, 2010.
- LIU Z., AN Q., XU J., CHEN M., HAN S., Wear performance of (nc-ALTiN)/(a-Si₃N₄) coating and (nc-ALCrN)/(aSi₃N₄) coating in high-speed machining of titanium alloys under dry and minimum quantity lubrication (MQL) conditions. *Wear*, 305:249–259, 2013.
- MACHADO A. R., COELHO R. T., ABRÃO A. M., SILVA M. B., Teoria da usinagem dos materiais. 9. ed. São Paulo: Blucher, 384 p. 2009.
- MESQUITA N. G., *Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação*. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 151p. 1992.
- NICOLA G.L., *Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço AISI H13 endurecido*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, RS, 137p. 2008.
- NOUARI M., LIST G., GIROT F., GÉHIN D., Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45:1436–1442. 2005.
- OLIVEIRA J.M., *Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas para produção de moldes e matrizes*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, RS, 110p, 2006.
- OTEC, Edge Rounding and Polishing of Tools. Apresentação, 2008.
- OVERHOLSER, R.W., STANGO, R.J., FOURNELLE R. A., Morphology of metal surface generated by nylon/abrasive filament brush. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43:193–202, 2003.
- PAUCKSH E., HOLSTEN S., LINß M., TIKAL F., *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien*, 12. Vieweg-Teubner, 2008.
- PRIARONE P. C., RIZZUTI S., SETTINERI L., VERGNANO G., Effects of cutting angle, edge preparation, and nano-structured coating on milling performance of a gamma titanium aluminide. *Journal of Materials Processing Technology*, 212:2619–2628, 2012.
- RAHIM E. A., SASAHARA H., A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys. *Tribology International*, 44:309–317. 2011.
- RECH J., Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool–chip interface in orthogonal dry turning. *Surface & Coatings Technology*, 200:5132–5139, 2006.

- RISSE K., *Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl*. Tese de Doutorado, RWTH Aachen, Aachen, 153p. 2006.
- RODRIGUEZ C. J. C., *Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing*. Tese de Doutorado, Universidade de Kassel, Alemanha. 205p., 2009.
- SAMBHAV K., TANDON P., DHANDE S.G., Geometric modeling and validation of twist drills with a generic point profile. *Applied Mathematical Modeling*, n. 36, p. 2384–2403, 2012.
- SHASHIDHARA Y. M., JAYARAM S. R., Vegetable oils as a potential cutting fluid - An evolution. *Tribology International*, 43:1073–1081. 2010.
- SHARMA A. K., TIWARI A. K., DIXIT A. R., Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 127:1–18, 2016.
- SILVA R. B. D., MACHADO A. R., EZUGWU E. O., BONNEY J., SALES W. S., Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti–6Al–4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, 213:1459–1464, 2013.
- SILVA R. B. D., VIEIRA J. M., CARDOSO R. N., CARVALHO H. C., COSTA E. S., MACHADO A. R., AVILA R. F. D., Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems. *Wear*, 271:2459–2465, 2011.
- SOMMER H., *Untersuchung von Schneidkanten-architekturen im Bezug auf den Zerspanprozess*. Giesserei Technik Kassel, 2013.
- STEMMER C. E., *Ferramentas de corte I*. 6. ed. Florianópolis: UFSC/FEPese, 2v. 2005.
- TEIXEIRA FILHO F., *A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH*. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, 230p. 2006.
- TIKAL F., *Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden*. Kassel University Press, 2009.

TOENSHOFF H. K., DENKENA B., Basics of Cutting and Abrasive Processes. Springer, 2013.

TURKOVICH B.F., FIELD M., Survey on Material Behaviour in Machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 30:533–540, 1981.

UHLMANN E., OBERSCHMIDT D., KUCHE Y., LÖWENSTEIN A., Cutting Edge Preparation of Micro Milling Tools. *Procedia CIRP*, 14:349–354, 2014.

UHLMANN E., OBERSCHMIDT D., KUCHE Y., LÖWENSTEIN A., Influence of cutting edge preparation on the performance of micro milling tools. *Procedia CIRP*, 46:214–217, 2016.

UHLMANN E., OBERSCHMIDT D., KUCHE Y., LÖWENSTEIN A., WINKER I., Effects of different cutting edge preparation methods on micro milling performance. *Procedia CIRP*, 46:352–355, 2016.

VASHISTA M., PAUL S., Correlation between surface integrity of ground medium carbon steel with Barkhausen Noise parameters and magnetic hysteresis loop characteristics. *Materials & Design*, 30:5:1595–1603, 2009.

VELÁSQUEZ J.D., TIDU A., BOLLE B., CHEVRIER P., FUNDENBERGER J.J., Sub-surface and surface analysis of high speed machined Ti–6Al–4V alloy. *Materials Science and Engineering A*, 527:2572–2578, 2010.

VENTURA C.E. H., KÖHLER J., DENKENA B., Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 19:129–134, 2015.

WEINERT K., INASAKI I., SUTHERLAND J.W., WAKABAYASHI T., Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53–2:511–537, 2004.

WYEN C., KNAPP W., WEGENER K., A new method for the characterisation of rounded cutting edges. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59:899–914, 2012.

YAMAGUCHI H., SRIVASTAVA A. K., TAN M. A., RIVEROS R. E., HASHIMOTO F., Magnetic abrasive finishing of cutting tools for machining of titanium alloys. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61:311–314, 2012.

ZEILMANN R. P., SANTIN R., NICOLA G. L., Qualidade superficial em fresamento de topo

esférico. *Máquinas e Metais*, Outubro:152- 159, 2006.

ZEILMANN R.P., VACARO T., BORDIN F.M. e SONDA V., Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte. *Anais do XVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva*, São Paulo, 2009.

ZEILMANN R. P., VACARO T., VIDOR M., SOARES R. M., BORDIN F. M., Análise do desgaste de ferramentas no fresamento de acabamento do aço d2 endurecido. *8º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes.*, São Paulo, 2010.

ZEILMANN R. P., VACARO T., BORDIN F. M., COMIN G. S., Integridade no fresamento com ferramentas submetidas a tratamento superficial. *7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, São Luiz – Maranhão, 2012.

ZEILMANN R.P., VACARO T., REIS E. S., WESTPHAL C. J., Desempenho de fresas de aço-rápido após tratamento superficial. *7º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação*, Rio de Janeiro, 2013.

APÊNDICE A – RELATÓRIOS DA MICROSCOPIA DE FOCO INFINITO

Figura 44 - Relatório simplificado do gume principal da ferramenta original (OF)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

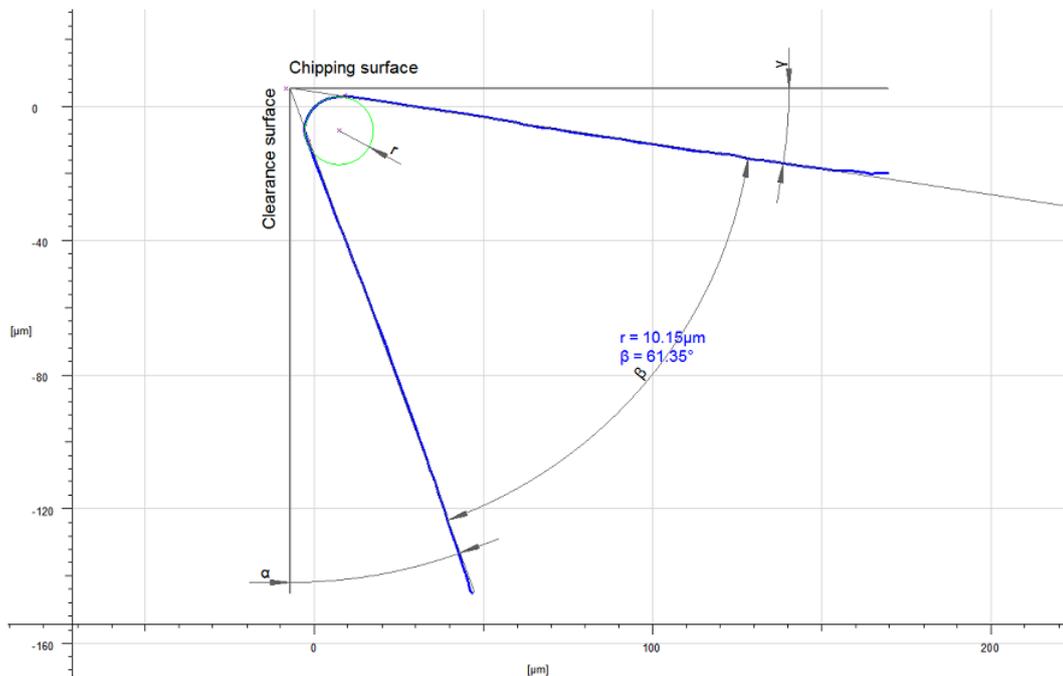
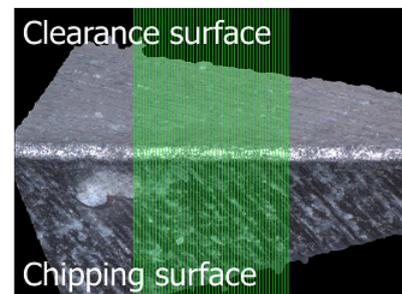
alicona

IF-EdgeMasterModule Measurement Report Cutting Edge Measurement

ReferenceType:
Number of extracted profiles:
Edge profile type:
Date of measurement:
Operator:

Standard Straight Edge 50x RL
50
No Bevel
16/11/2015 13:55:07
Denis Boing

Name	Value	[u]	Description
r	10.15	µm	Mean radius of mean edge
α	19.93	°	Clearance angle
β	61.35	°	Wedge angle
γ	8.72	°	Chip angle
S α	15.90	µm	Dist. apex to end of clearance roundness
S γ	18.27	µm	Dist. apex to end of chipping roundness
K	1.15		Symmetry of cutting edge
Δr	10.00	µm	Min. dist. of edge to apex
W	11.66	µm	Edge width
Ecq	0.08	µm	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Trumpet		Estimated Curvature



Measurement performed by Alicona IF-EdgeMasterModule, 16/11/2015 13:55:07

Figura 45 – Relatório simplificado do gume secundário da ferramenta original (OF)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

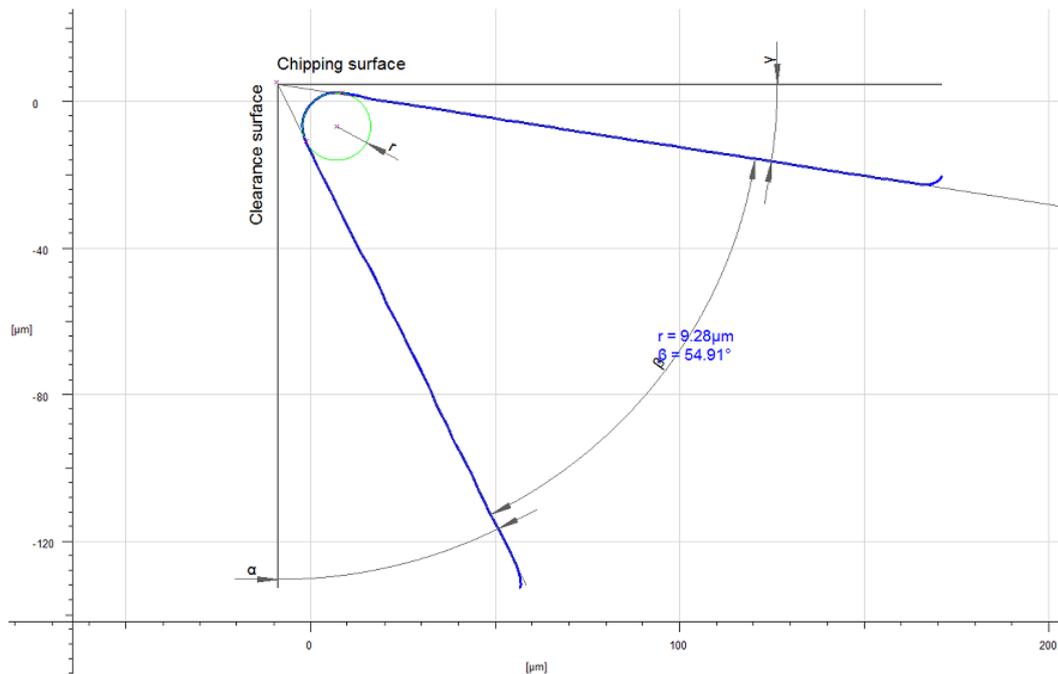
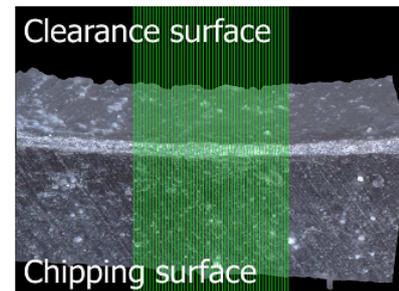
alicona

IF-EdgeMasterModule Measurement Report Cutting Edge Measurement

ReferenceType:
Number of extracted profiles:
Edge profile type:
Date of measurement:
Operator:

Standard Straight Edge 50x RL
50
No Bevel
16/11/2015 10:39:29
Denis Boing

Name	Value	[u]	Description
r	9.28	μm	Mean radius of mean edge
α	26.16	$^\circ$	Clearance angle
β	54.91	$^\circ$	Wedge angle
γ	8.93	$^\circ$	Chip angle
S α	17.80	μm	Dist. apex to end of clearance roundness
S γ	17.53	μm	Dist. apex to end of chipping roundness
K	0.98		Symmetry of cutting edge
Δr	11.10	μm	Min. dist. of edge to apex
W	11.35	μm	Edge width
Ecq	0.03	μm	Form deviation of circle (RMS)



Measurement performed by Alicona IF-EdgeMasterModule, 16/11/2015 10:39:29

Figura 46 – Relatório simplificado do gume principal da ferramenta com acabamento por arraste (AA)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

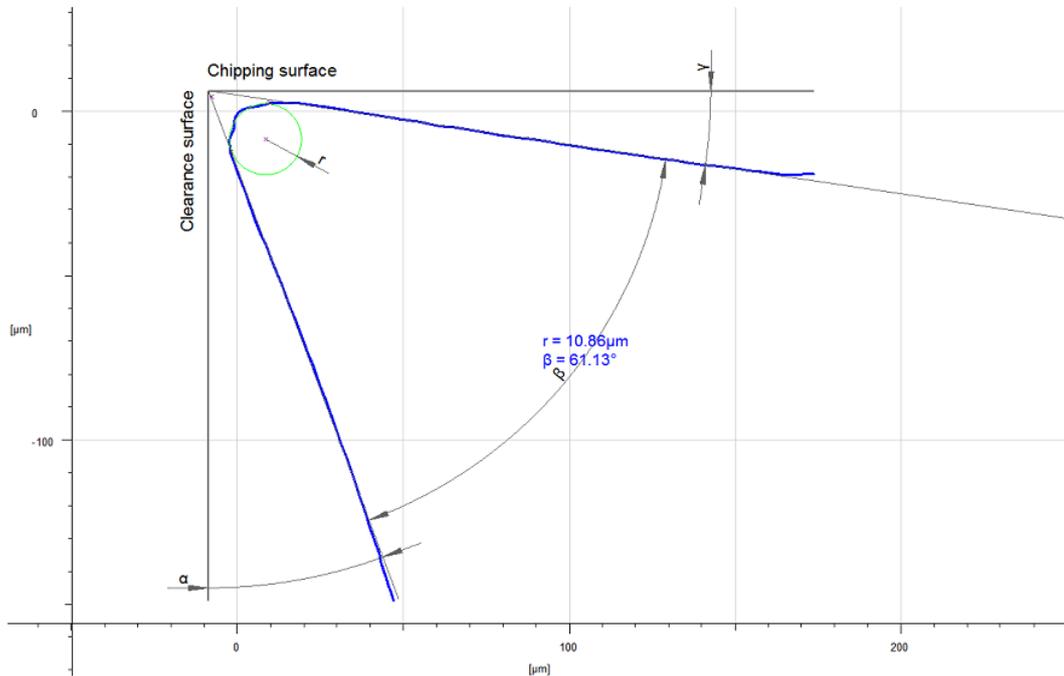
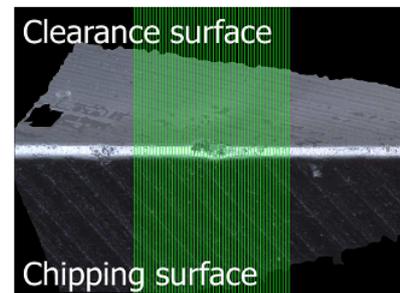
alicona

IF-EdgeMasterModule Measurement Report Cutting Edge Measurement

ReferenceType:
Number of extracted profiles:
Edge profile type:
Date of measurement:
Operator:

Standard Straight Edge 50x RL
50
No Bevel
16/11/2015 13:33:58
Denis Boing

Name	Value	[u]	Description
r	10.86	μm	Mean radius of mean edge
α	20.32	°	Clearance angle
β	61.13	°	Wedge angle
γ	8.55	°	Chip angle
Sα	20.48	μm	Dist. apex to end of clearance roundness
Sγ	17.36	μm	Dist. apex to end of chipping roundness
K	0.85		Symmetry of cutting edge
Δr	9.93	μm	Min. dist. of edge to apex
W	12.16	μm	Edge width
Ecq	0.42	μm	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Waterfall		Estimated Curvature



Measurement performed by Alicona IF-EdgeMasterModule, 16/11/2015 13:33:58

Figura 47 – Relatório simplificado do gume secundário da ferramenta com acabamento por arraste (AA)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

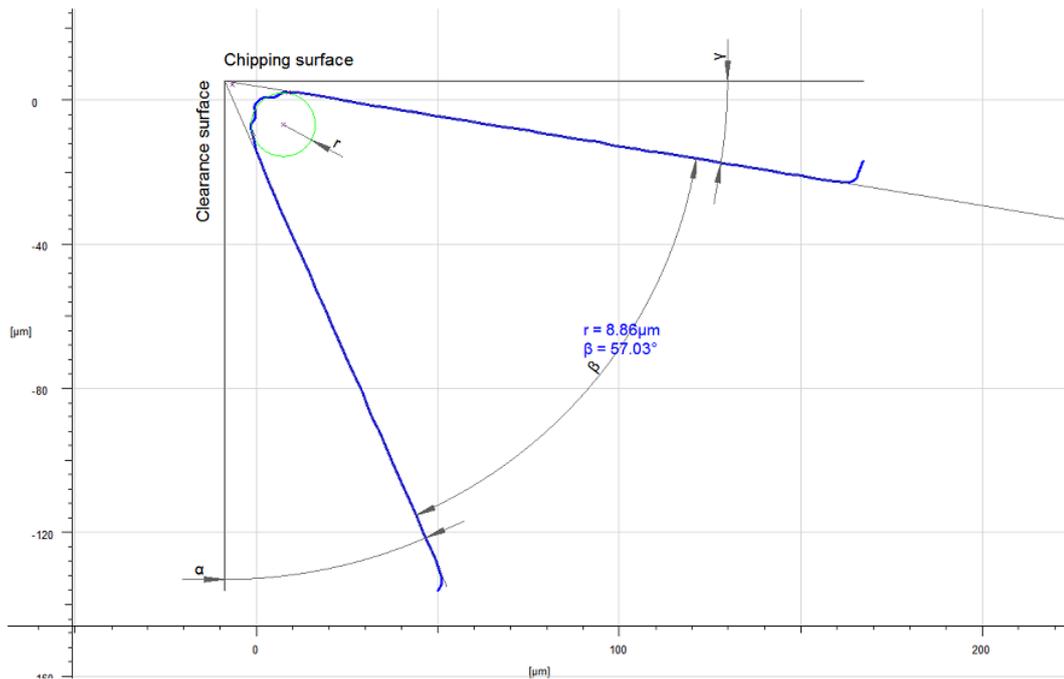
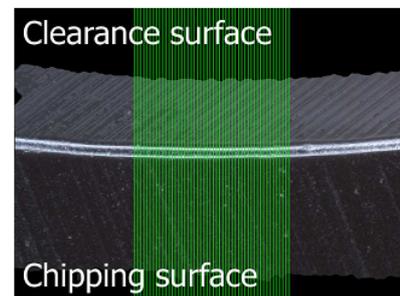
alicona

IF-EdgeMasterModule Measurement Report Cutting Edge Measurement

ReferenceType:
Number of extracted profiles:
Edge profile type:
Date of measurement:
Operator:

Standard Straight Edge 50x RL
50
No Bevel
16/11/2015 11:36:58
Denis Boing

Name	Value	[u]	Description
r	8.86	μm	Mean radius of mean edge
α	23.54	$^\circ$	Clearance angle
β	57.03	$^\circ$	Wedge angle
γ	9.43	$^\circ$	Chip angle
S α	21.05	μm	Dist. apex to end of clearance roundness
S γ	12.91	μm	Dist. apex to end of chipping roundness
K	0.61		Symmetry of cutting edge
Δr	9.13	μm	Min. dist. of edge to apex
W	10.33	μm	Edge width
Ecq	0.50	μm	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Waterfall		Estimated Curvature



Measurement performed by Alicona IF-EdgeMasterModule, 16/11/2015 11:36:58

Figura 48 – Relatório simplificado do gume principal da ferramenta com polimento por cerdas abrasivas (POL)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

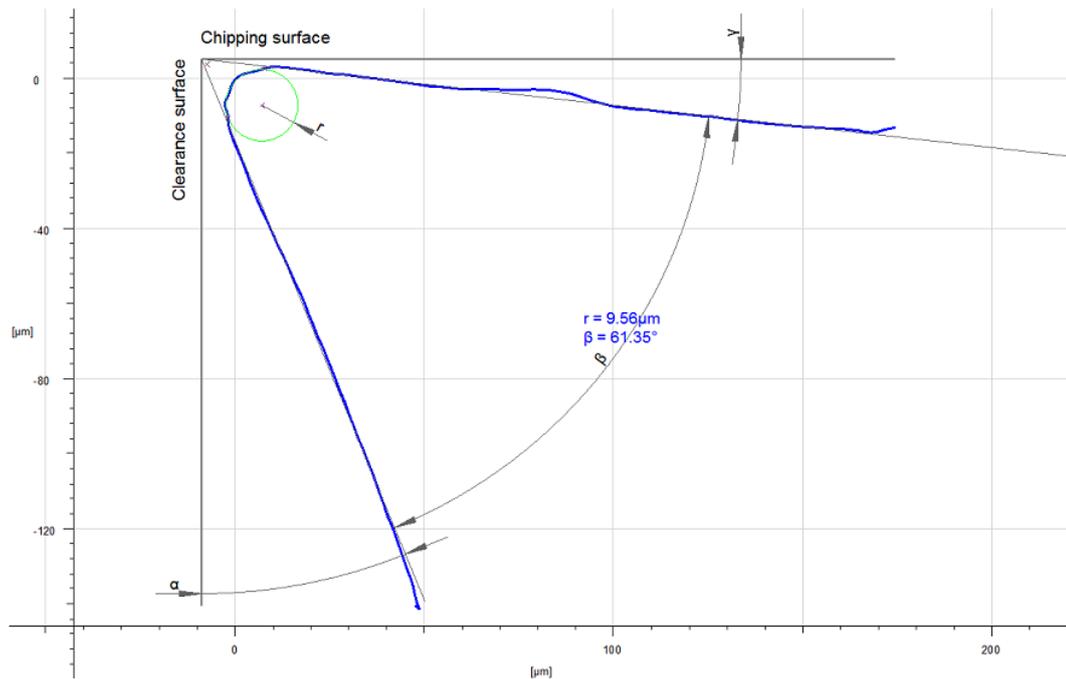
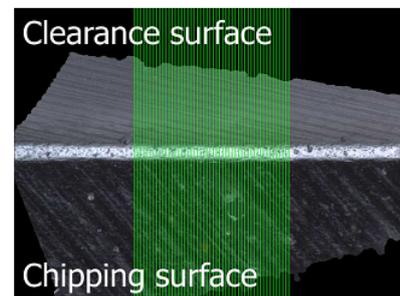
alicona

IF-EdgeMasterModule Measurement Report Cutting Edge Measurement

ReferenceType:
Number of extracted profiles:
Edge profile type:
Date of measurement:
Operator:

Standard Straight Edge 50x RL
50
No Bevel
16/11/2015 14:18:06
Denis Boing

Name	Value	[u]	Description
r	9.56	μm	Mean radius of mean edge
α	22.20	$^\circ$	Clearance angle
β	61.35	$^\circ$	Wedge angle
γ	6.45	$^\circ$	Chip angle
S α	16.51	μm	Dist. apex to end of clearance roundness
S γ	18.16	μm	Dist. apex to end of chipping roundness
K	1.10		Symmetry of cutting edge
Δr	8.59	μm	Min. dist. of edge to apex
W	10.64	μm	Edge width
Ecq	0.18	μm	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Trumpet		Estimated Curvature



Measurement performed by Alicona IF-EdgeMasterModule, 16/11/2015 14:18:06

Figura 49 – Relatório simplificado do gume principal da ferramenta com polimento por cerdas abrasivas (POL)

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

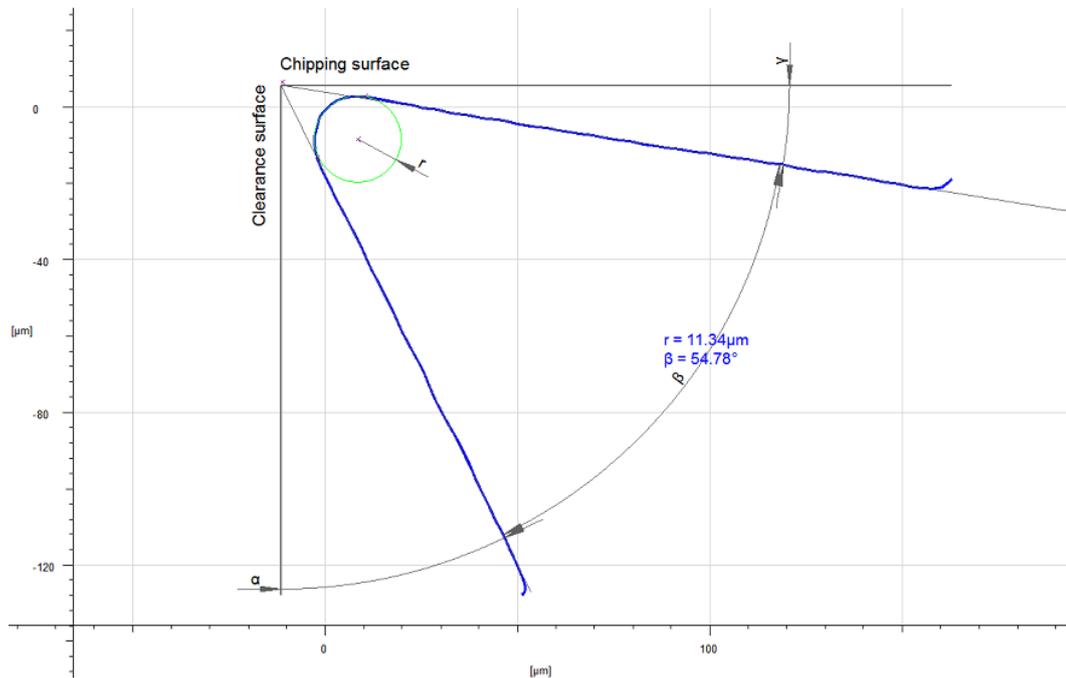
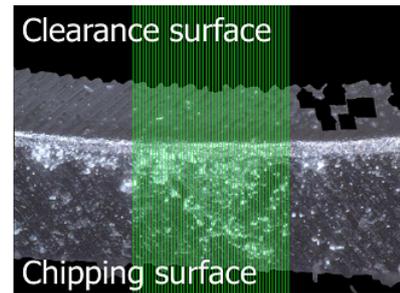
alicona

IF-EdgeMasterModule Measurement Report Cutting Edge Measurement

ReferenceType:
Number of extracted profiles:
Edge profile type:
Date of measurement:
Operator:

Standard Straight Edge 50x RL
50
No Bevel
16/11/2015 10:59:44
Denis Boing

Name	Value	[u]	Description
r	11.34	μm	Mean radius of mean edge
α	26.05	°	Clearance angle
β	54.78	°	Wedge angle
γ	9.17	°	Chip angle
Sα	23.45	μm	Dist. apex to end of clearance roundness
Sγ	20.66	μm	Dist. apex to end of chipping roundness
K	0.88		Symmetry of cutting edge
Δr	13.43	μm	Min. dist. of edge to apex
W	13.83	μm	Edge width
Ecq	0.12	μm	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Waterfall		Estimated Curvature



Measurement performed by Alicona IF-EdgeMasterModule, 16/11/2015 10:59:44

Fonte: O autor, 2016

APÊNDICE B – PERFIS DE RUGOSIDADE DAS FERRAMENTAS

Figura 50 - Perfil de rugosidade do gume principal da ferramenta OF

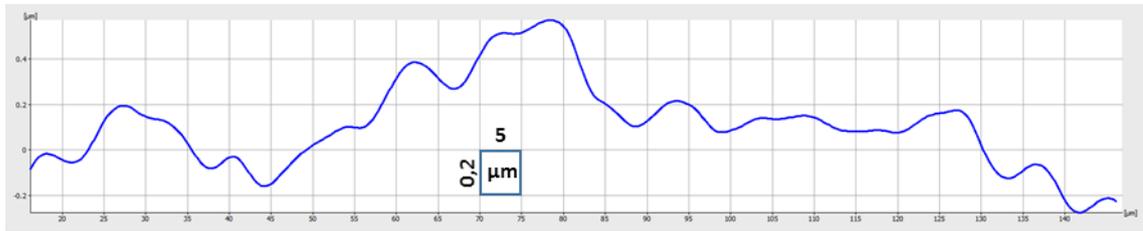


Figura 51 - Perfil de rugosidade do gume secundário da ferramenta OF

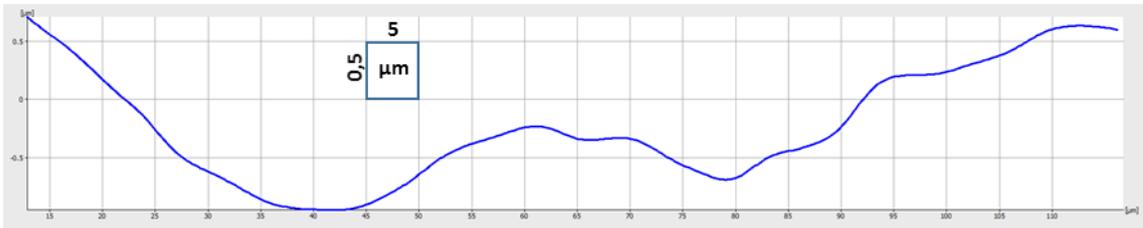


Figura 52 - Perfil de rugosidade do gume principal da ferramenta AA

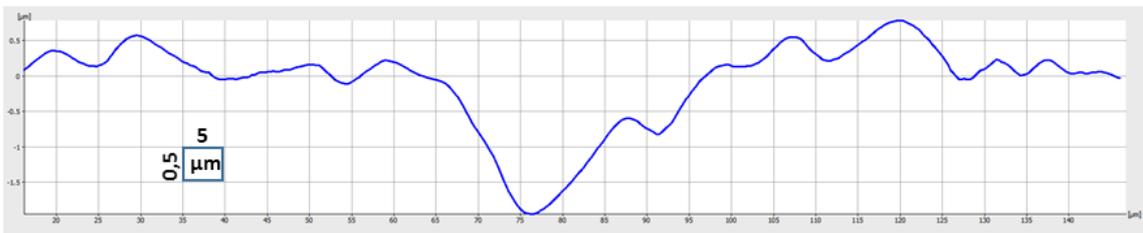


Figura 53 - Perfil de rugosidade do gume secundário da ferramenta AA

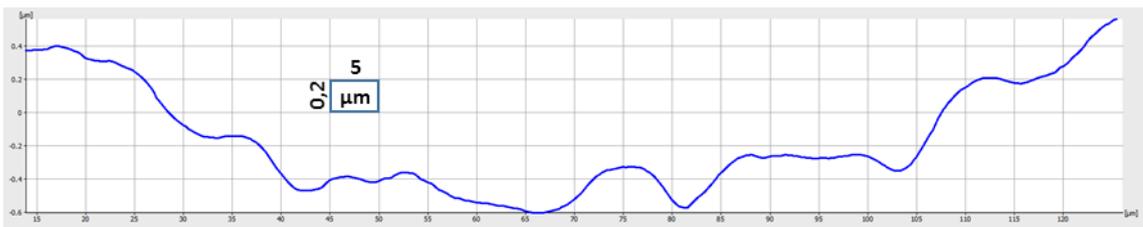


Figura 54 - Perfil de rugosidade do gume principal da ferramenta POL

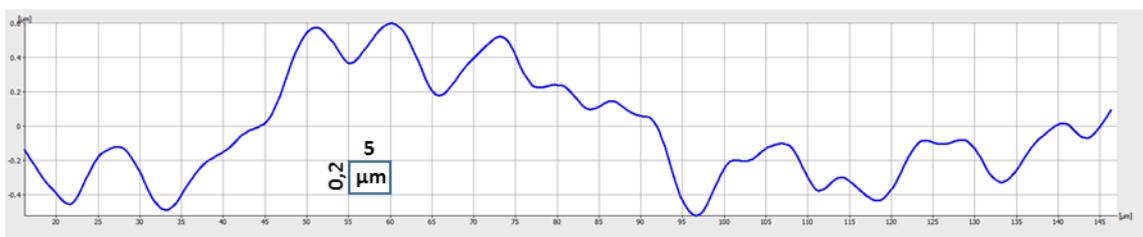
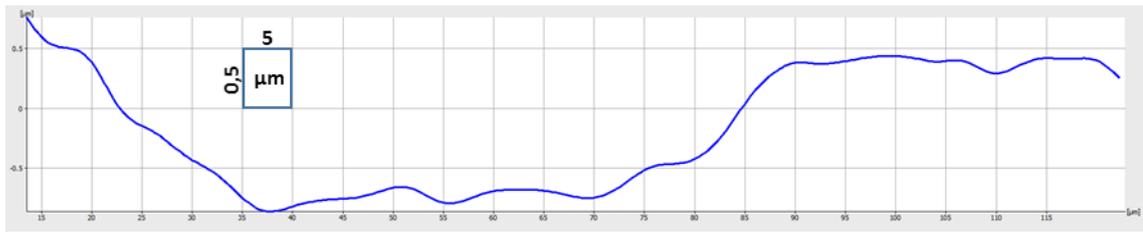


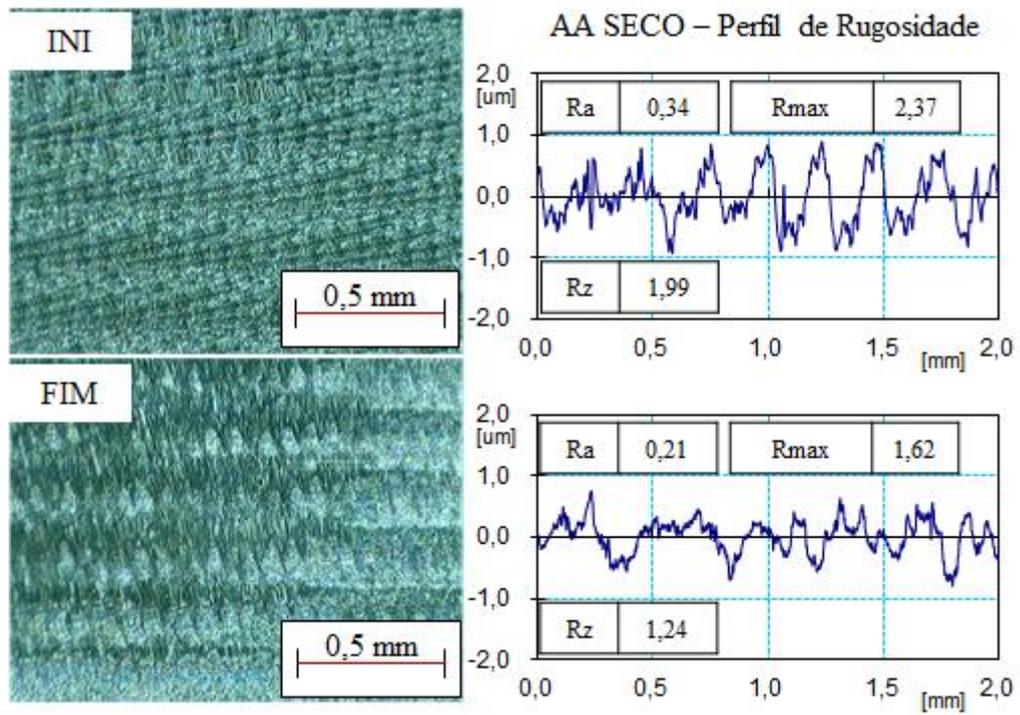
Figura 55 – Perfil de rugosidade do gume secundário da ferramenta POL



Fonte: O autor, 2016

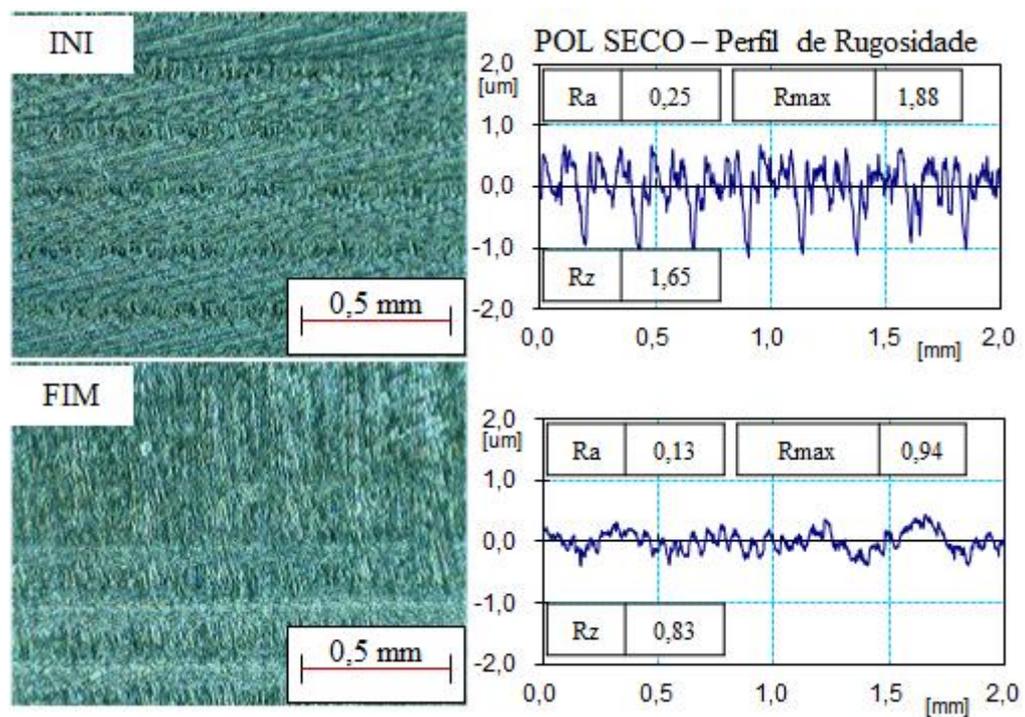
APÊNDICE C – DEMAIS TEXTURAS E PERFIS DE RUGOSIDADE

Figura 56 – Textura e perfil de rugosidade da condição AA SECO



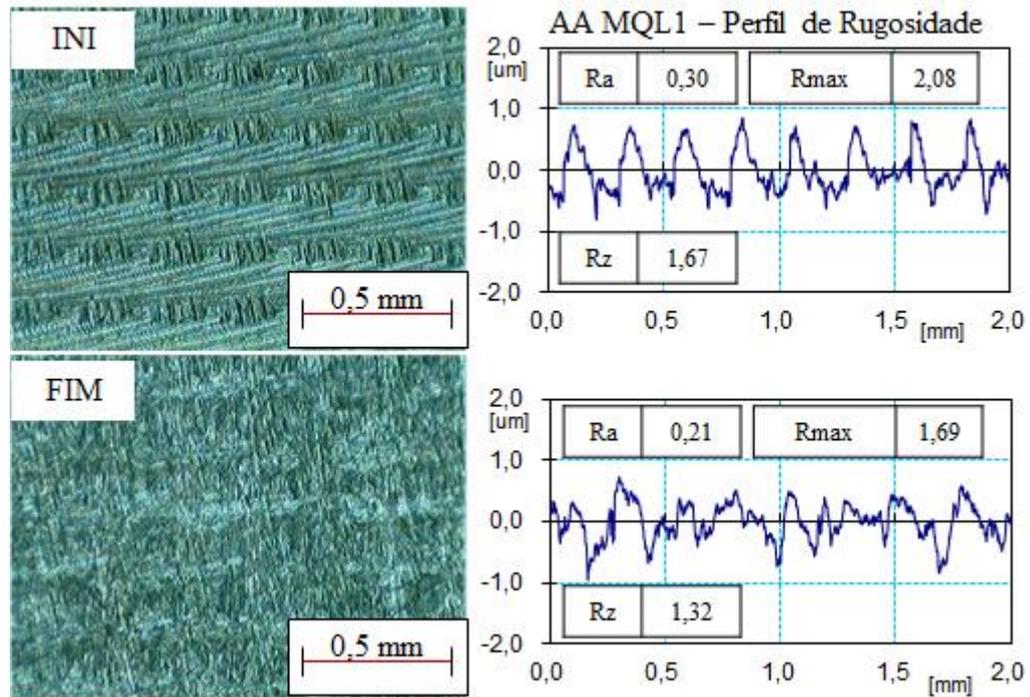
Fonte: O autor, 2016

Figura 57 – Textura e perfil de rugosidade da condição POL SECO



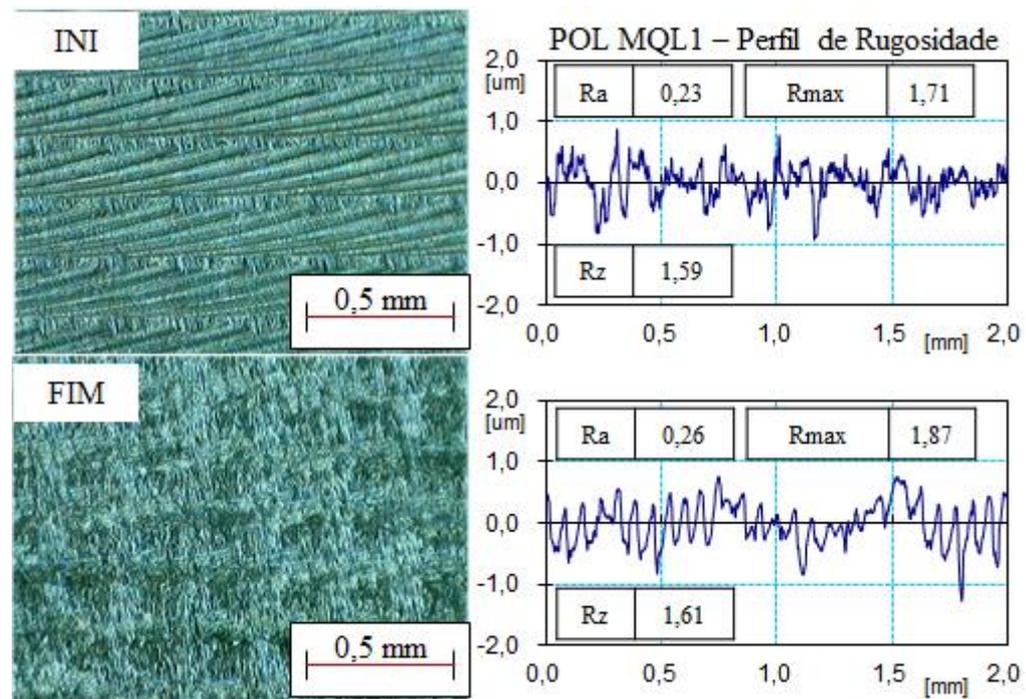
Fonte: O autor, 2016

Figura 58 – Textura e perfil de rugosidade da condição AA MQL1



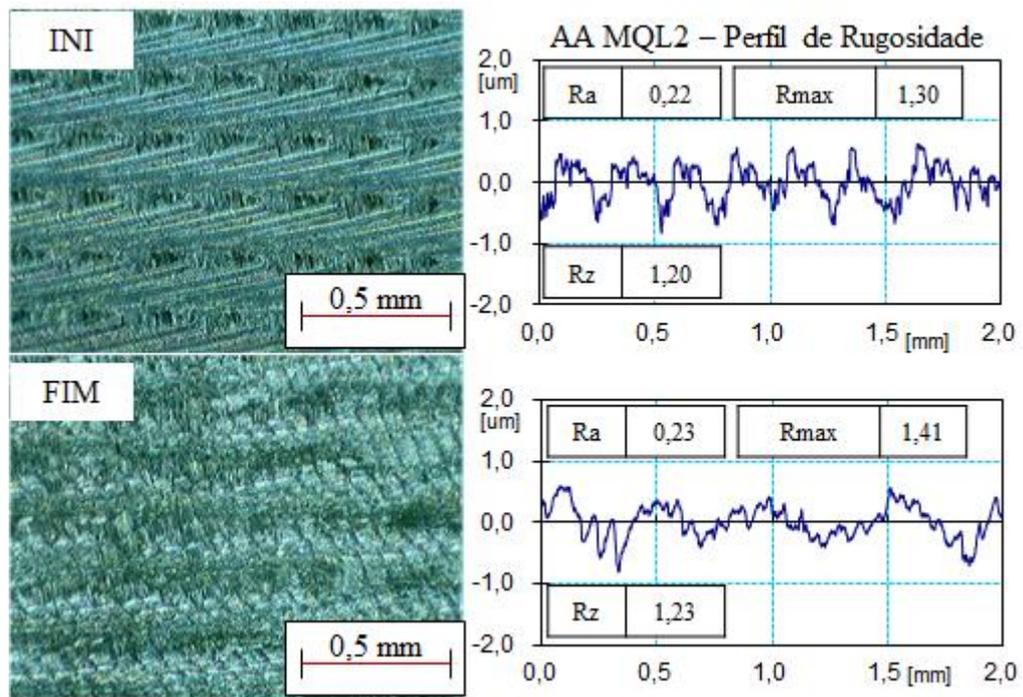
Fonte: O autor, 2016

Figura 59 – Textura e perfil de rugosidade da condição POL MQL1



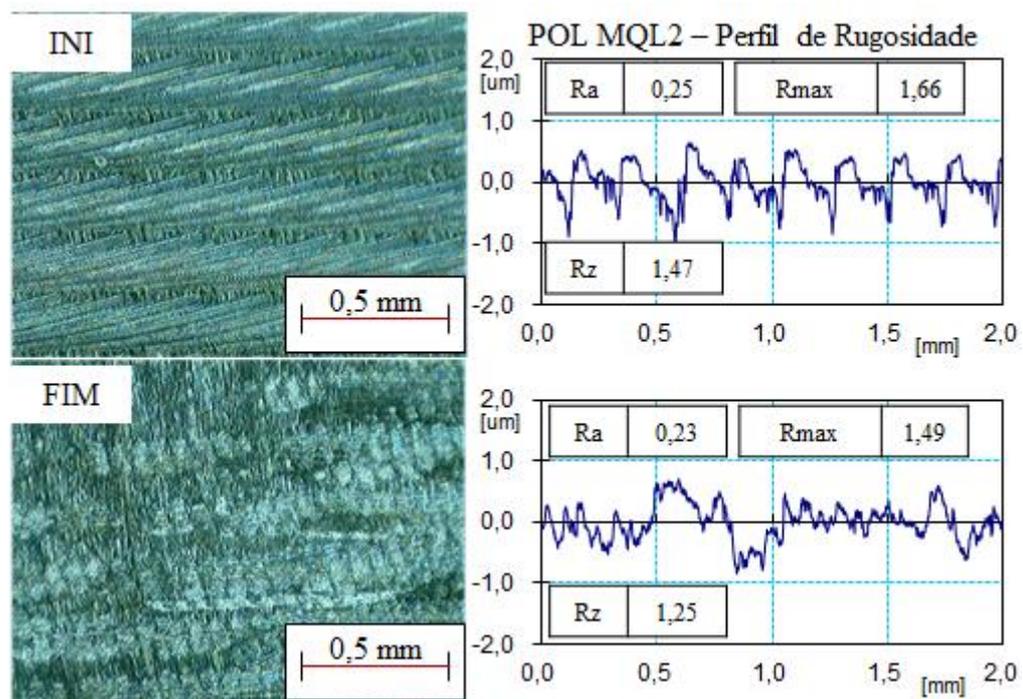
Fonte: O autor, 2016

Figura 60 – Textura e perfil de rugosidade da condição AA MQL2



Fonte: O autor, 2016

Figura 61 – Textura e perfil de rugosidade da condição POL MQL2

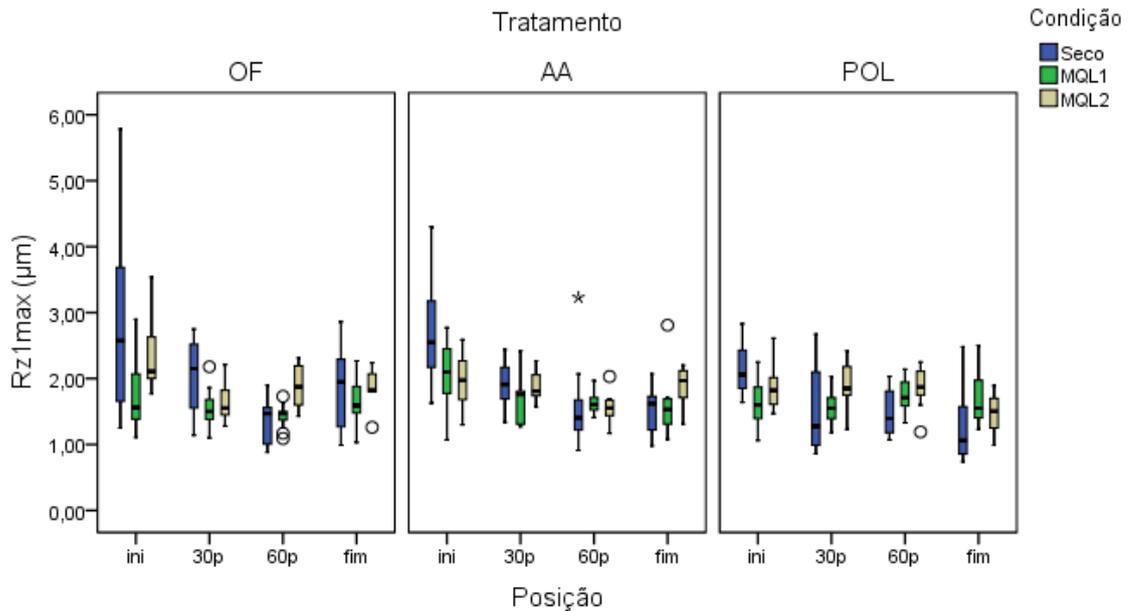


Fonte: O autor, 2016

APÊNDICE D – DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA TRANSVERSAL

Os dados de Rmax da rugosidade longitudinal não trazidos a seguir, assim como sua análise de variância.

Figura 62 – Rugosidade longitudinal Rmax



Fonte: O autor, 2016

Tabela 7 – ANOVA da rugosidade longitudinal Rmax

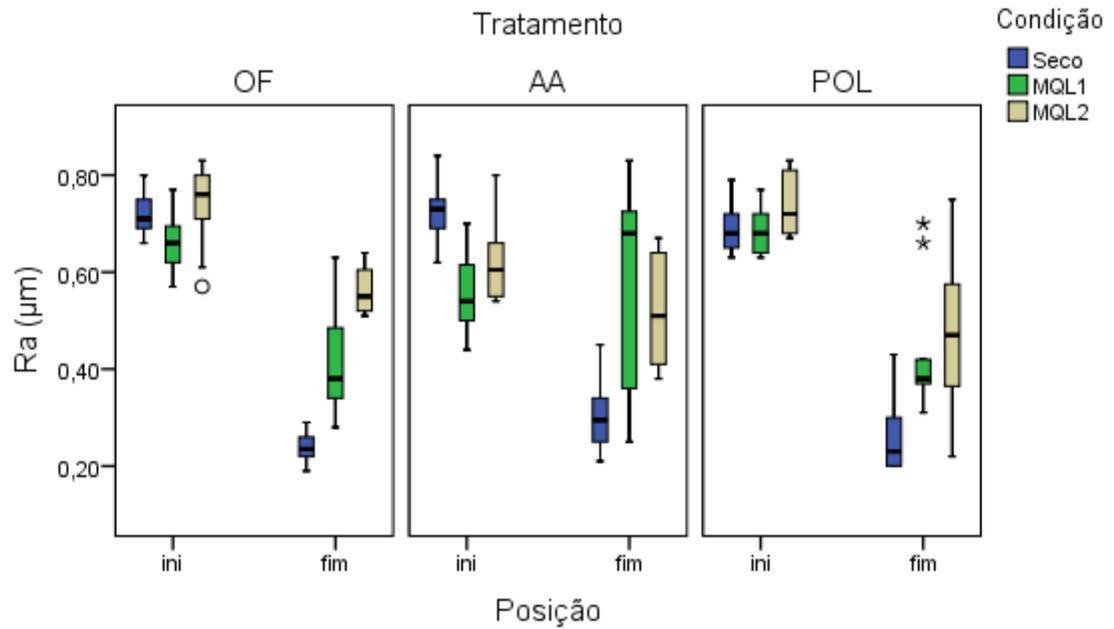
Variável dependente: Rmax

Fonte	Soma dos quadrados	gl	Média Quadrática	F	Sig.
Posição	18,225	3	6,075	26,148	,000
Tratamento	2,195	2	1,097	4,723	,009
Condição	2,693	2	1,347	5,796	,003
Posição * Tratamento	3,279	6	,546	2,352	,031
Posição * Condição	9,787	6	1,631	7,021	,000
Tratamento * Condição	2,985	4	,746	3,212	,013
Posição * Tratamento * Condição	2,872	12	,239	1,030	,420
Erro	79,692	343	,232		
Total	125,135	378			

Fonte: O autor, 2016

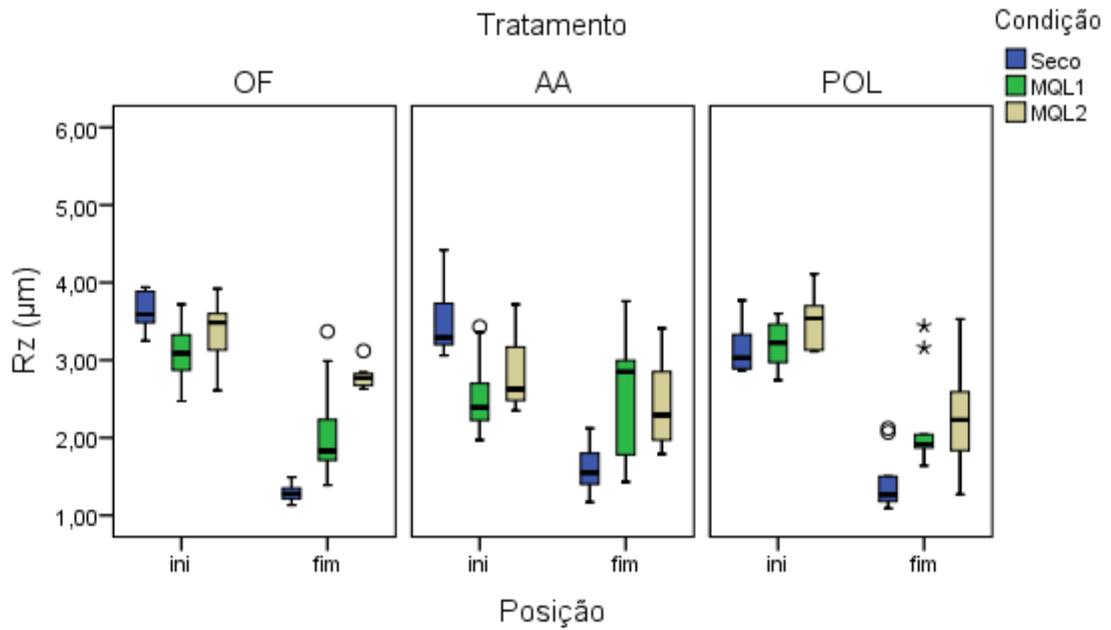
A rugosidade transversal foi medida apenas nas posições início e fim de vida da ferramenta. A seguir os gráficos das medições transversais e sua análise estatística por ANOVA.

Figura 63 – Gráfico da rugosidade transversal Ra



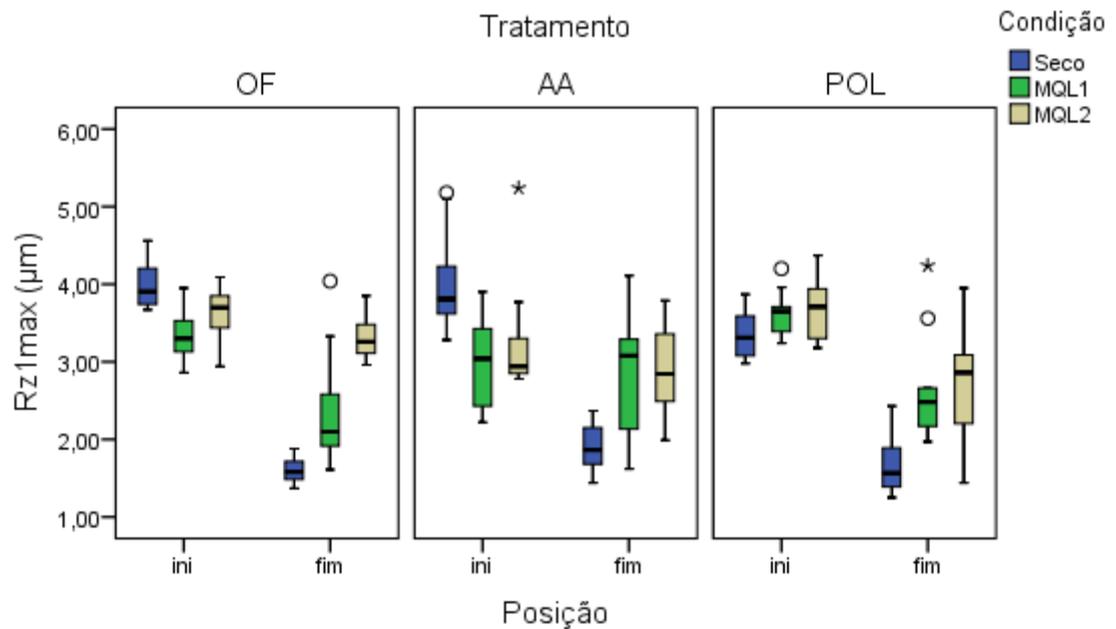
Fonte: O autor, 2016

Figura 64 – Gráfico da rugosidade transversal Rz



Fonte: O autor, 2016

Figura 65 – Gráfico da rugosidade transversal Rmax



Fonte: O autor, 2016

Em seguida as análises de variância da rugosidade transversal com as variáveis posição (A), tratamento (B) e condição (C).

Tabela 8 – ANOVA da rugosidade transversal Ra

Fonte	Soma		Média		
	Quadrática	gl	Quadrática	F	Sig.
A	3,238	1	3,238	327,496	,000
B	,004	2	,002	,191	,826
C	,409	2	,205	20,700	,000
A*B	,181	2	,091	9,159	,000
A*C	,730	2	,365	36,916	,000
B*C	,076	4	,019	1,920	,109
A*B*C	,115	4	,029	2,909	,023
Erro	1,740	176	,010		
Total	6,584	193			

Tabela 9 – ANOVA da rugosidade transversal Rz

Fonte	Soma		Média		
	Quadrática	gl	Quadrática	F	Sig.
A	60,069	1	60,069	282,039	,000
B	,547	2	,274	1,285	,279
C	5,986	2	2,993	14,053	,000
A*B	3,413	2	1,707	8,013	,000
A*C	16,743	2	8,372	39,307	,000
B*C	2,307	4	,577	2,708	,032
A*B*C	3,238	4	,809	3,800	,005
Erro	37,485	176	,213		
Total	130,767	193			

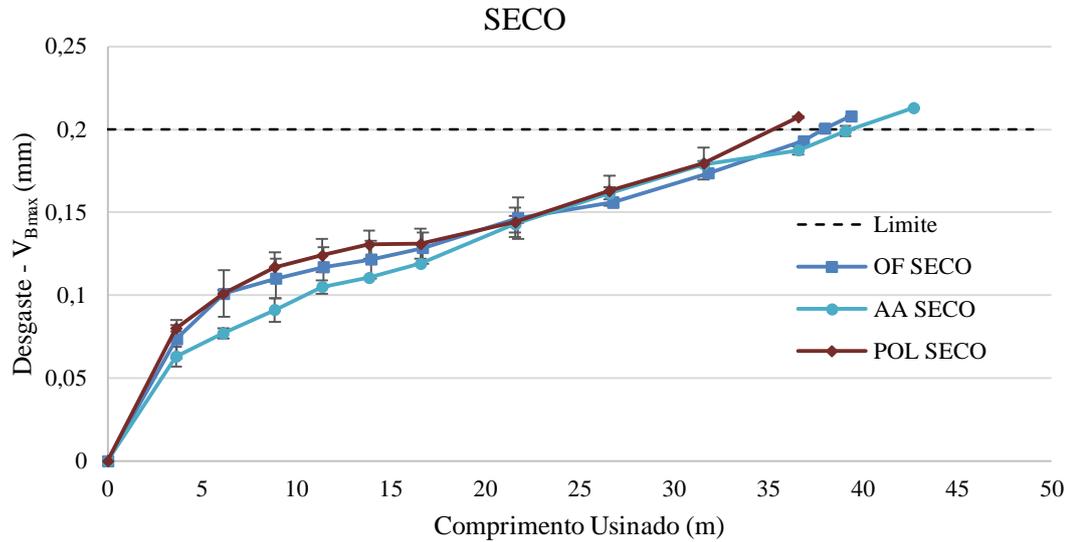
Tabela 10 – ANOVA da rugosidade transversal Rmax

Fonte	Soma		Média		
	Quadrática	gl	Quadrática	F	Sig.
A	56,917	1	56,917	206,454	,000
B	,167	2	,084	,304	,739
C	7,226	2	3,613	13,105	,000
A*B	1,232	2	,616	2,234	,110
A*C	20,672	2	10,336	37,492	,000
B*C	4,264	4	1,066	3,867	,005
A*B*C	3,838	4	,959	3,480	,009
Erro	48,521	176	,276		
Total	145,368	193			

APÊNDICE E – CURVAS DE DESGASTE POR CONDIÇÃO

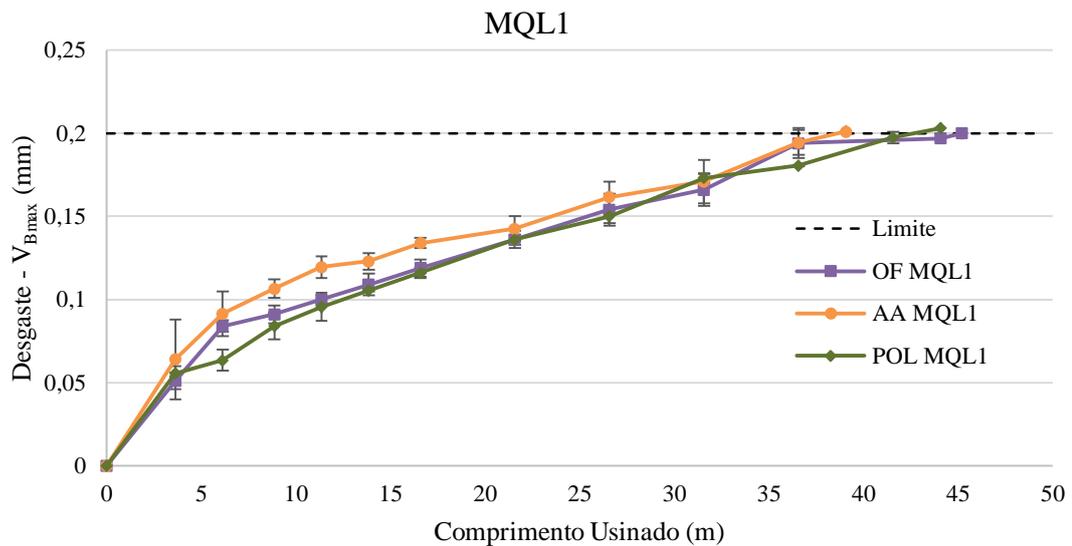
A seguir são apresentadas as curvas de desgaste divididas em SECO, MQL1 e MQL2.

Figura 66 – Curvas de vida para a condição SECO



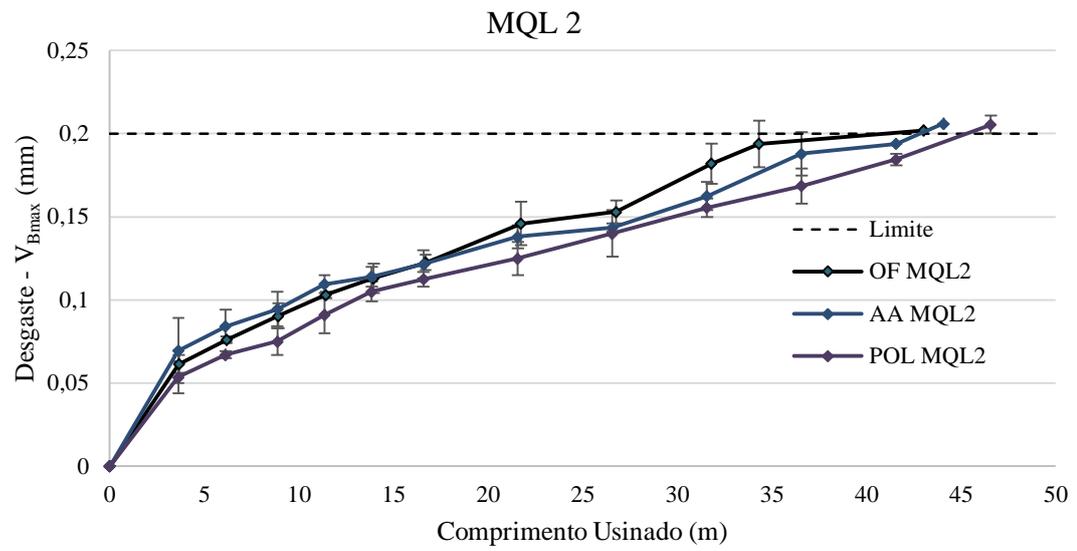
Fonte: O autor, 2016

Figura 67 – Curvas de vida para a condição MQL1



Fonte: O autor, 2016

Figura 68 – Curvas de vida para a condição MQL2



Fonte: O autor, 2016

ANEXO A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL

Tabela 11 – Composição Química do Material AISI P20

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,458	0,333	1,953	0,023	0,010	1,844	0,231	0,708	0,001
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	Fe	
0,100	0,010	0,059	0,001	0,010	0,031	0,009	94,219	

Fonte: Laudo Técnico UCS, 2012

ANEXO B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

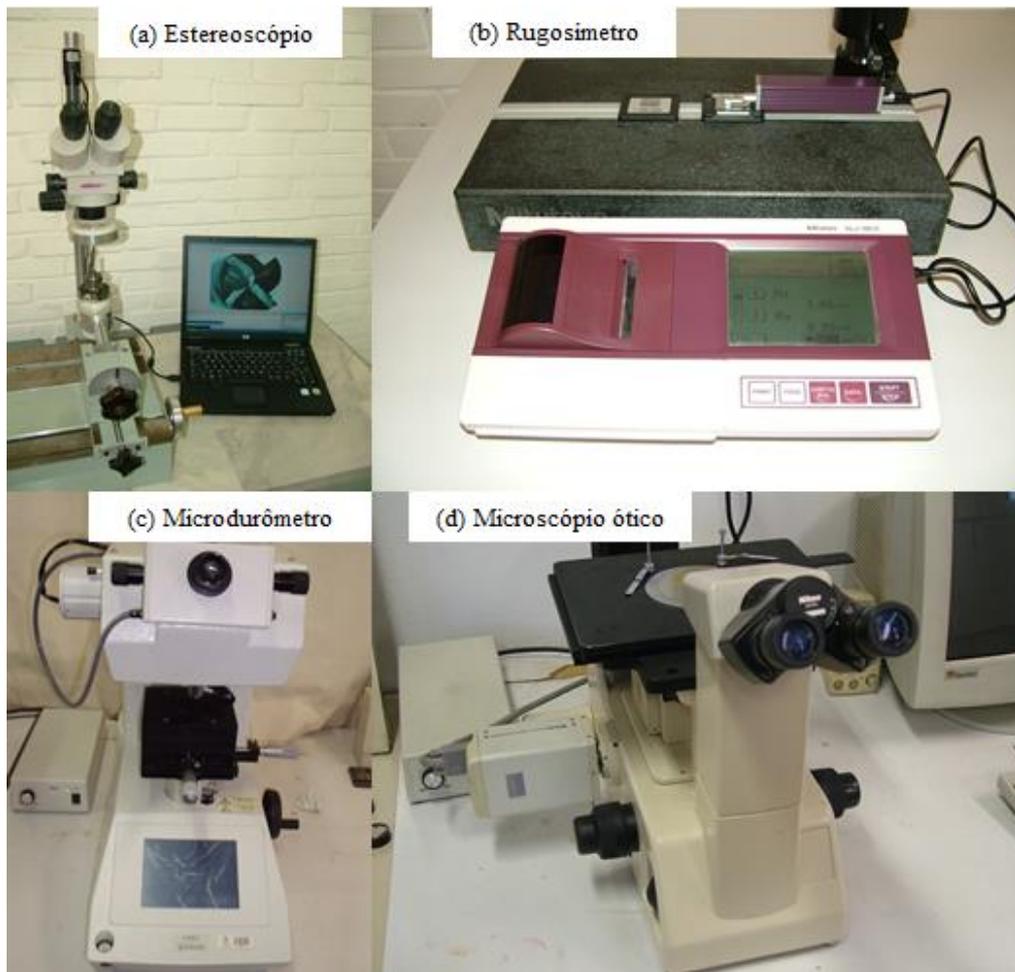
Os equipamentos utilizados para a realização deste trabalho são apresentados nas figuras 68 a 72.

Figura 69 – Centro de Usinagem utilizado nos ensaios



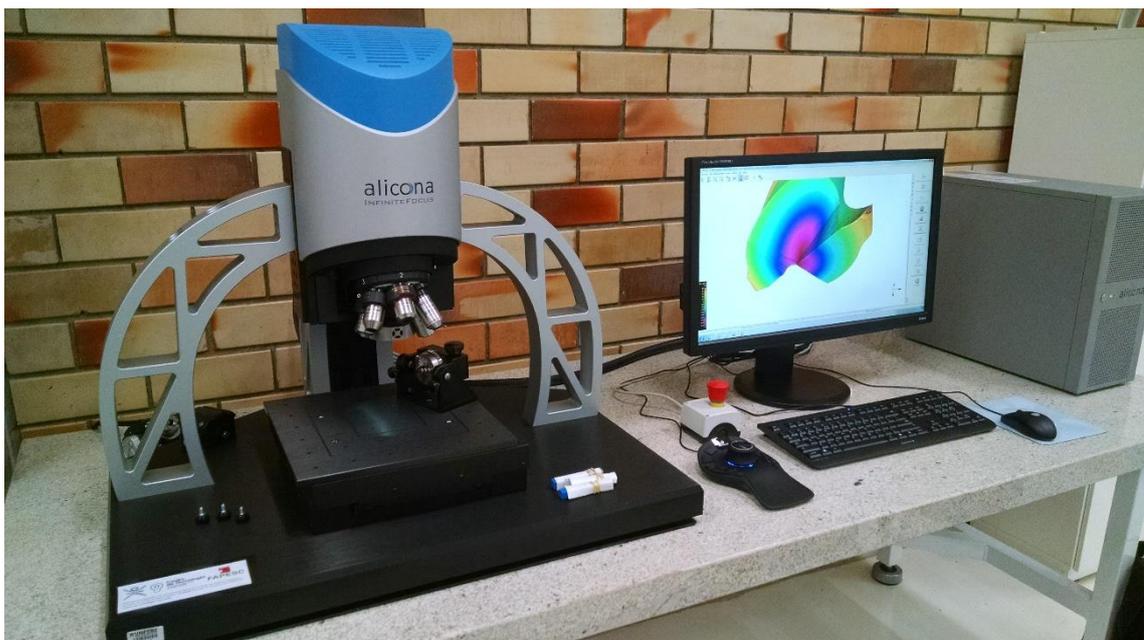
Fonte: O autor

Figura 70 – Equipamentos utilizados para caracterização



Fonte: O autor

Figura 71 – Microscópio de foco infinito Alicona



Fonte: O autor, 2016

Figura 72 – Máquina de medição universal Zoller



Fonte: E. Zoller GmbH & Co. KG, 2016

Figura 73 – Equipamento de MEV – FEG Tescan



Fonte: TESCAN, 2016