

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**WILLIAM BUCKELL**

**AVALIAÇÃO DA PREPARAÇÃO DE GUME ATRAVÉS DO PROCESSO DE ESCOVAÇÃO  
PARA APLICAÇÃO EM FRESAMENTO DE TOPO RETO**

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**WILLIAM BUCKELL**

**AVALIAÇÃO DA PREPARAÇÃO DE GUME ATRAVÉS DO PROCESSO DE ESCOVAÇÃO  
PARA APLICAÇÃO EM FRESAMENTO DE TOPO RETO**

Trabalho de conclusão de curso II  
apresentado à Universidade de Caxias do  
Sul como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Mecânica.  
Área de concentração: Processos de  
Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann.

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**WILLIAM BUCKELL**

**AVALIAÇÃO DA PREPARAÇÃO DE GUME ATRAVÉS DO PROCESSO DE ESCOVAÇÃO  
PARA APLICAÇÃO EM FRESAMENTO DE TOPO RETO**

Trabalho de conclusão de curso II  
apresentado à Universidade de Caxias do  
Sul como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Mecânica.  
Área de concentração: Processos de  
Fabricação.

**Aprovado em:** 13 de dezembro de 2019

**Banca Examinadora**

Prof. Orientador Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Victor Hugo Velázquez Acosta

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Vieceli

Universidade de Caxias do Sul – UCS

## AGRADECIMENTOS

Sempre buscamos enfrentar nossos desafios de forma sensata e autônoma, porém, devemos ter a sabedoria de que integração com o próximo pode proporcionar experiências e conhecimentos de forma recíproca e única. Desta forma, ao longo dos anos vividos para conclusão da graduação, o apoio da família e amigos foi imprescindível.

Faço meus agradecimentos a todos familiares que estiveram presentes nessa caminhada. Ao meu pai Gilberto pelo incentivo, exemplo de trabalho e honestidade. A minha mãe Suzana (*in memoriam*) pelo carinho, educação e exemplo de perseverança. A minha irmã Angélica por todo apoio e auxílio em diversas ocasiões.

À minha namorada Lidiane, pelo afeto, companheirismo, contribuição e compreensão ao longo de toda a graduação, principalmente na etapa final, durante este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, pela oportunidade de vivenciar a pesquisa, aos ensinamentos e conhecimentos transmitidos durante esse período de convivência.

Ao colega João Davi Schenkel, pelo acolhimento junto ao grupo de pesquisa, pela amizade, ensinamentos, companheirismo e auxílio durante todo este trabalho.

Aos colegas Matias Meneguzzo e Ronaldo Girardelo, pela amizade, apoio, conselhos e ensinamentos.

Ao Eng. José Adair de Oliveira Giubel, responsável pelos laboratórios de ensaios mecânicos (LAMEC), pelo auxílio prestado na análise do material dos corpos de prova e por conceder acesso aos laboratórios.

Aos técnicos dos laboratórios, Gaston Henrique Rossa e Axel Schneider Muller, pela disponibilidade e auxílio prestado durante a realização dos ensaios experimentais.

À empresa OTEC Präzisionsfinish GmbH pelo financiamento do projeto ao qual este trabalho está vinculado, bem como a possibilidade de concessão da bolsa de iniciação científica, aos quais participei por três semestres.

À empresa Secta Tools Indústria e Comércio de Ferramentas Ltda., pela doação das fresas. Ao Eng. Bruno Ballardin Pacheco por todo auxílio prestado.

A todos que contribuíram de alguma forma para concepção deste trabalho, meu sincero muito obrigado.

## RESUMO

A condição do gume de uma ferramenta é de grande importância para o processo de usinagem. Após a fabricação da cunha, o gume pode apresentar defeitos, rebarbas e microlascamento. A preparação de gume é uma alternativa que pode ser realizada com o objetivo de remover esses defeitos oriundos da fabricação resultando em aumento da estabilidade mecânica da cunha de corte, refletindo em aumento da vida útil da ferramenta. Esse trabalho trata a respeito do processo de preparação de gume em fresas de topo reto através do processo de escovação utilizado pelo Grupo de Usinagem (GUS) da Universidade de Caxias do Sul (UCS), que utiliza miniretífica pneumática e folhas de acabamento superficial composta de microabrasivos. Este processo foi investigado e parâmetros foram propostos de forma que arredondamentos com tendência à simetria ou levemente deslocados para a face da cunha de corte fossem gerados, conforme embasamento teórico referente para o fresamento. Teste de escovação foi desenvolvido aplicando o processo de escovação em ferramenta especial, com gume linear ao longo da superfície cilíndrica, a fim de facilitar as avaliações e os ensaios na busca dos melhores parâmetros, a ser posteriormente executado nas preparações das fresas topo reto helicoidais, que serão submetidas a teste de usinagem. No teste de escovação foi avaliado através da técnica de contato e imagens MEV os raios e os perfis de transição gerados nos gumes. A configuração escolhida apresentou raio médio de 6,71  $\mu\text{m}$  e fator de forma estimado em 0,94, levemente deslocado para o flanco. Duas fresas originais de fábricas foram submetidas a teste de usinagem em aço AISI P20, posteriormente foram reafiadas e preparadas para execução de novo teste. Tanto para as fresas originais quanto para as escovadas foi avaliado o desgaste de flanco e qualidade superficial gerada a fim de comparações. O acompanhamento do desgaste de flanco retornou uma vida útil para as fresas escovadas de 21,35 % maior, e mínima incidência de microlascamentos. As texturas obtidas de modo geral não apresentam grandes diferenças e as rugosidades sofreram a redução de 1 a 2  $\mu\text{m}$  para valores de  $R_a$ . A preparação de gume por escovação se mostra eficiente, e baseada nessa investigação, melhores resultados podem ser obtidos conforme a usinagem posterior aplicada.

**Palavras-Chave:** Preparação de Gume. Escovação. Fresamento. Fresamento de Topo Reto. Comportamento de Desgaste. Qualidade Superficial.

## ABSTRACT

The condition of the cutting edge is of great importance to the machining process. After the wedge is made, the cutting edge may be defective, burr, and micro chipping. Edge preparation is an alternative that can be performed with the objective of removing these defects from manufacturing resulting in increased mechanical stability of the cutting wedge reflecting increased tool life. This paper deals with the process of cutting edge in straight end mills through the brushing process used by the Machining Group (GUS) of the University of Caxias do Sul (UCS), which uses pneumatic mini-grinding and surface finishing sheets composed of microabrasives. This process was investigated and parameter configurations were proposed in such a way that symmetry-prone or slightly shifted roundings to the face of the cutting wedge were generated, according to the theoretical basis for milling. Brushing test was developed by applying the special tool brushing process, with linear edge along the cylindrical surface, in order to facilitate the evaluations and the tests in search of the best parameters to be performed later in the preparation of the helical straight end mills, which will be subjected to machining tests. In the brushing test, the radii and the transition profiles generated at the edges were evaluated through the contact technique and SEM images. The chosen configuration presented an average radius of 6.71  $\mu\text{m}$  and an estimated form factor of 0.94, slightly shifted to the flank. Two original milling cutters were subjected to an AISI P20 steel machining test, later re-sharpened and prepared for further testing. For both original and brushed cutters, the flank wear and surface quality generated were evaluated for comparisons. Flank wear follow-up has returned a 21.35% longer life for brushed cutters and minimal incidence of microlanding. The textures obtained in general do not appear to differ greatly and the roughness decreased from 1 to 2  $\mu\text{m}$  to Ra values. Brushing edge preparation proves to be efficient, and based on this research, better results can be obtained depending on the subsequent machining applied.

**Keywords:** Cutting Edge Preparation. Brushing. Milling. End Milling. Wear Behavior. Surface Quality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de fresamento frontal e tangencial .....	19
Figura 2 – Modelos típicos de fresas topo .....	21
Figura 3 – Comparação de fresas .....	23
Figura 4 – Configuração de fresa topo reto.....	24
Figura 5 – Modo de verificação do método do fator de forma .....	26
Figura 6 – Alterações resultantes da preparação de gume.....	29
Figura 7 – Comparação de gumes.....	30
Figura 8 – Escovas circulares de filamentos abrasivos .....	31
Figura 9 – Desgaste em ferramentas de corte .....	35
Figura 10 – Curva de vida da ferramenta: Desgaste x Tempo .....	37
Figura 11 – Folhas de acabamento Scotch-Brite™ e discos recortados.....	43
Figura 12 – Fresa protótipo para teste de escovação .....	43
Figura 13 – Esquema representativo do teste de escovação .....	44
Figura 14 – Dispositivo de escovação .....	46
Figura 15 – Fresa e mandril de fresamento.....	48
Figura 16 – Bloco AISI P20 .....	49
Figura 17 – Caracterização fresa protótipo .....	51
Figura 18 – Imagem MEV da folha com Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub> .....	52
Figura 19 – Imagem MEV da folha com SiC .....	53
Figura 20 – Configurações e resultados do teste de escovação na fase 1 .....	54
Figura 21 – Configurações e resultados do teste de escovação na fase 2 .....	55
Figura 22 – Configurações e resultados do teste de escovação na fase 3 .....	56
Figura 23 – Configurações e resultados do teste de escovação na fase 4 .....	57
Figura 24 – Qualidade superficial dos gumes preparados.....	58
Figura 25 – Avaliação do fator de forma.....	60
Figura 26 – Escovação da fresa principal .....	61
Figura 27 – Comparativo entre fresas originais e escovadas .....	63
Figura 28 – Desgastes de flanco .....	67
Figura 29 – Texturas e rugosidades das fresas originais .....	68
Figura 30 – Texturas e rugosidades das fresas escovadas .....	69

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Relação do ensaio experimental.....	42
Quadro 2 – Especificação das folhas de acabamento superficial .....	42
Quadro 3 – Codificações das fresas.....	62
Tabela 1 – Configurações do teste de escovação .....	45
Tabela 2 – Composição química aço AISI P20 .....	48

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Medidas dos raios gerados na ferramenta P3.....	59
Gráfico 2 – Curvas comparativas de desgaste.....	65
Gráfico 3 – Avaliação geral das rugosidades .....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões
3M	<i>Minnesota Mining and Manufacturing Company</i> (Empresa de Mineração e Manufatura de Minnesota)
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
CAD	<i>Computer-aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
EDM	<i>Electrical Discharger Machining</i> (Usinagem por Descarga Elétrica)
ESC	Escovada
FUCS	Fundação Universidade de Caxias do Sul
GUS	Grupo de Usinagem
IEDI	Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial
MEF	Método de Elementos Finitos
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
ORI	Original
TM	<i>Trade Mark</i> (Marca Comercial)
UCS	Universidade de Caxias do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	graus Celsius
μm	micrometro
$a_e$	profundidade de trabalho
$a_p$	profundidade de corte
$d$	diâmetro da fresa
$f_z$	avanço por dente
$h$	espessura de cavaco
$h_{min}$	espessura mínima de cavaco
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i> (Dureza Rockwell na escala C)
K	Fator de forma de arredondamento
KB	largura do desgaste de cratera
KM	distância do centro do desgaste de cratera à aresta
KT	profundidade do desgaste de cratera
kW	quilowatt
$l$	comprimento de escovação
$l_1$	comprimento de corte
$l_2$	comprimento total da fresa
m/s	metros por segundo
$n^\circ$	número
$r$	raio
rpm	rotações por minuto
$t$	tempo
$v$	velocidade de rotação
VB	desgaste de flanco médio
$VB_C$	desgaste de ponta
$VB_{max}$	desgaste de flanco máximo
$VB_N$	desgaste de entalhe
$v_c$	velocidade de corte
$V_f$	velocidade de avanço
$\alpha_0$	ângulo de incidência ou folga

$\beta_0$	ângulo da cunha de corte
$\gamma_0$	ângulo de saída
$\gamma_e$	ângulo de saída efetivo
$\varepsilon$	ângulo de mergulho

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	AMBIENTE DE TRABALHO .....	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
2.1	FRESAMENTO .....	18
<b>2.1.1</b>	<b>Fresamento de topo</b> .....	<b>20</b>
2.1.1.1	Macrogeometria de fresa de topo reto .....	22
2.1.1.2	Geometria do gume de fresa de topo reto inteiriça .....	24
2.2	PREPARAÇÃO DE GUME .....	27
<b>2.2.1</b>	<b>Processo de escovação</b> .....	<b>31</b>
2.3	USINABILIDADE .....	33
<b>2.3.1</b>	<b>Desgastes em ferramentas de corte</b> .....	<b>34</b>
2.3.1.1	Desgastes e avarias gerados no fresamento.....	35
2.3.1.2	Vida útil de ferramenta com gume preparado .....	37
<b>2.3.2</b>	<b>Integridade superficial</b> .....	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>
3.1	PLANEJAMENTO DE EXECUÇÃO.....	41
3.2	TESTE DE ESCOVAÇÃO .....	42
3.3	TESTE DE USINAGEM.....	46
3.4	FRESA DE TOPO RETO.....	47
3.5	CORPO DE PROVA.....	48
3.6	VARIÁVEIS AVALIADAS.....	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>51</b>
4.1	TESTE DE ESCOVAÇÃO .....	51
<b>4.1.1</b>	<b>Fase 1</b> .....	<b>53</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Fase 2</b> .....	<b>54</b>

<b>4.1.3</b>	<b>Fase 3</b>	<b>56</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Fase 4</b>	<b>57</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Avaliação final do teste de escovação</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>TESTE DE USINAGEM</b>	<b>62</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Caracterização das fresas</b>	<b>63</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Vida útil das fresas</b>	<b>64</b>
4.2.2.1	Comportamento de desgaste	64
4.2.2.2	Avaliação de desgaste	66
<b>4.2.3</b>	<b>Qualidade superficial</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>72</b>
	<b>BIBLIOGRAFIAS</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, cada vez mais, o desenvolvimento e inovação de produtos e serviços vem crescendo, e mudanças tecnológicas passaram a ocorrer em menores espaços de tempo (IEDI, 2017).

Segundo o Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (2017), as parcerias entre instituições públicas e empresas privadas resultaram em um ponto importante para os programas de inovação de vários países emergentes. As empresas passam a ter suporte para resolução de problemas, desenvolver novos mercados ou gerar valor por meio da cooperação ou coprodução. Atividades de pesquisa e desenvolvimento, que ocorrem a partir de investimentos empresariais, são fundamentais para reativação da dinâmica empresarial, para o crescimento da produtividade e qualidade do serviço ou produto (MELLO, 2017).

No Rio Grande do Sul, o setor industrial ganha destaque no cenário econômico brasileiro. Segundo dados de Christian Dihlmann, em entrevista cedida ao site Usinagem Brasil (2018), o estado apresenta mais de 350 ferramentarias das aproximadamente 2000 que compõe o cenário nacional.

Atendendo a demanda de inovação tecnológica das indústrias metalmeccânicas da região nordeste do estado, a Universidade Caxias do Sul (UCS), através do Grupo de Usinagem (GUS), desenvolve em suas instalações vários projetos de pesquisas. Essas pesquisas são voltadas ao aprofundamento de conhecimento sobre os processos de usinagem (UCS, 2016). Nos últimos anos, tem-se desenvolvido projetos de pesquisa que buscam melhorias no desempenho de ferramentas de corte, pois esse fator é afetado principalmente pela condição da microgeometria da ferramenta, podendo ser alterada em busca de melhorias, através de processos de preparação da região do gume. Atualmente, em parceria com indústria, o GUS tem trabalhado em um projeto que busca entender o comportamento de ferramentas de corte no processo de fresamento, após passarem por processos de preparação de gume.

Dos variados processos que podem ser utilizados, será estudado nesse trabalho, o processo de escovação com filamentos de nylon abrasivo. Serão investigados os parâmetros para a execução do processo de escovação na preparação de gume de fresas, que retorne em resultados satisfatórios perante testes de fresamento, na busca da melhora da qualidade superficial gerada e aumento da vida útil da ferramenta.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

No setor de manufatura, o processo de usinagem tem papel importante na fabricação das mais variadas peças. Assim, a busca por melhorias passa a ser necessária devido à constante competitividade. Indústrias buscam maximização de lucros, minimização de custos, aumento da produtividade e melhora da qualidade.

O formato e as condições em que se apresenta o gume de uma ferramenta são de grande importância para o processo de usinagem em que a mesma será submetida (DENKENA; BIERMANN, 2014).

Alteração e otimização da região que compõe a microgeometria de ferramentas foram mencionadas primeiramente por Fisher, em 1897, relatando que o gume não é totalmente afiado (DENKENA; BIERMANN, 2014). Após a fabricação da ferramenta pelo processo de retificação, o gume, que é a transição entre a face e flanco da cunha de corte, pode apresentar rebarbas, irregularidades, microlascamentos e defeitos oriundos do processo de fabricação (RODRIGUEZ, 2009).

A partir disso, nos últimos anos foram desenvolvidas várias pesquisas sobre os mais variados processos para a preparação do gume de ferramentas de corte, onde os principais objetivos são a redução dos defeitos oriundos da fabricação, homogeneização da superfície de transição entre face e flanco, aumento da estabilidade da cunha de corte, redução dos esforços térmicos e mecânicos, aumento da vida útil da ferramenta, aumento da confiabilidade do processo, além da melhora da relação de contato junto à superfície gerada (DENKENA; BIERMANN, 2014).

Desta forma, esse trabalho é desenvolvido sobre a preparação de gume por escovação em fresas, buscando uma melhora de desempenho das ferramentas, e, por ser de vasta aplicação e de interesse de muitas indústrias da região, o processo de usinagem realizado nesse trabalho para testar as ferramentas preparadas será o fresamento de topo reto.

## 1.2 AMBIENTE DE TRABALHO

A Universidade de Caxias do Sul (UCS) é uma Instituição Comunitária de Educação Superior constituída oficialmente em 10 de fevereiro de 1967. Tem como mantenedora a Fundação Universidade de Caxias do Sul (FUCS), entidade jurídica de

Direito Privado constituída em outubro de 1973. A FUCS é uma entidade beneficente de assistência social, comunitária e filantrópica, que procura manter-se em permanente diálogo com a sociedade regional.

Com atuação no campo do ensino, pesquisa, inovação e extensão, a UCS mantém unidades em oito cidades, seu Campus-Sede está localizado na cidade de Caxias do Sul no Bairro Petrópolis na Rua Francisco Getúlio Vargas, número 1130.

Dentre os vários núcleos de pesquisa existentes na UCS, um deles é o Grupo de Usinagem (GUS) vinculado ao Centro de Ciências Exatas e da Tecnologia e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Devido à necessidade e demanda das empresas da região serrana em aprimorar seus processos de usinagem, o grupo de pesquisa foi criado no ano de 2002, composto por professores, estudantes de graduação e pós-graduação, além de bolsistas de iniciação científica que realizam pesquisas na área de processos de manufatura por usinagem.

Dentre as linhas de pesquisas, um tema que ganha destaque é a usinagem com ferramentas que sofreram alteração ou preparação da aresta de corte.

A execução desse trabalho está vinculada ao GUS e faz parte de um projeto com indústria, no qual estão sendo investigados processos de preparação de gume.

### 1.3 OBJETIVOS

Na sequência, são apresentados os objetivos que fomentam a realização desse trabalho de conclusão de curso.

#### 1.3.1 Objetivo geral

Esse trabalho tem como objetivo a investigação da preparação de gume através do processo de escovação para que gere arredondamento no gume a fim de melhorar o desempenho de fresas topo reto inteiriças de metal-duro.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são elencados:

- a) compreender os benefícios da preparação de gume e microgeometrias;
- b) compreender a preparação de gume por escovação com filamentos de nylon com microabrasivos;
- c) propor parâmetros para o processo de escovação que gere arredondamento de gume adequado conforme literatura ;
- d) analisar a execução da preparação na superfície de transição entre face e flanco da cunha de corte;
- e) avaliar a influência da preparação de gume por escovação quanto a qualidade superficial da peça usinada; e
- f) avaliar a influência da preparação de gume por escovação quanto a vida útil da ferramenta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo em vista o objetivo geral, esse capítulo busca apresentar os principais assuntos que fundamentam a realização desse trabalho.

### 2.1 FRESAMENTO

No setor industrial vários processos de fabricação são empregados, um dos utilizados na geração de peças com geometria variável é a usinagem, no qual, partindo de uma matéria-prima de dimensões maiores que o produto final, através da remoção de material (cavaco), obtém-se a peça de geometria desejada com suas dimensões e acabamento superficial, este último, resultante do processo e estratégia de remoção adotada (KLOCKE, 2018).

Pertencendo ao processo de fabricação por usinagem, tem-se o processo de fresamento, um dos mais versáteis processos de execução mecânica destinada à geração das mais variadas formas geométricas (FERRARESI, 1970). Boa parte de superfícies não planas, não cilíndricas e geometrias especiais somente são obtidas pelo fresamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

No fresamento, a remoção de material da peça é realizada através do movimento combinado de deslocamento da peça por uma trajetória e rotação/deslocamento de uma ferramenta. Para que esses movimentos ocorram, se faz necessária uma máquina-ferramenta chamada fresadora (STEMMER, 2005).

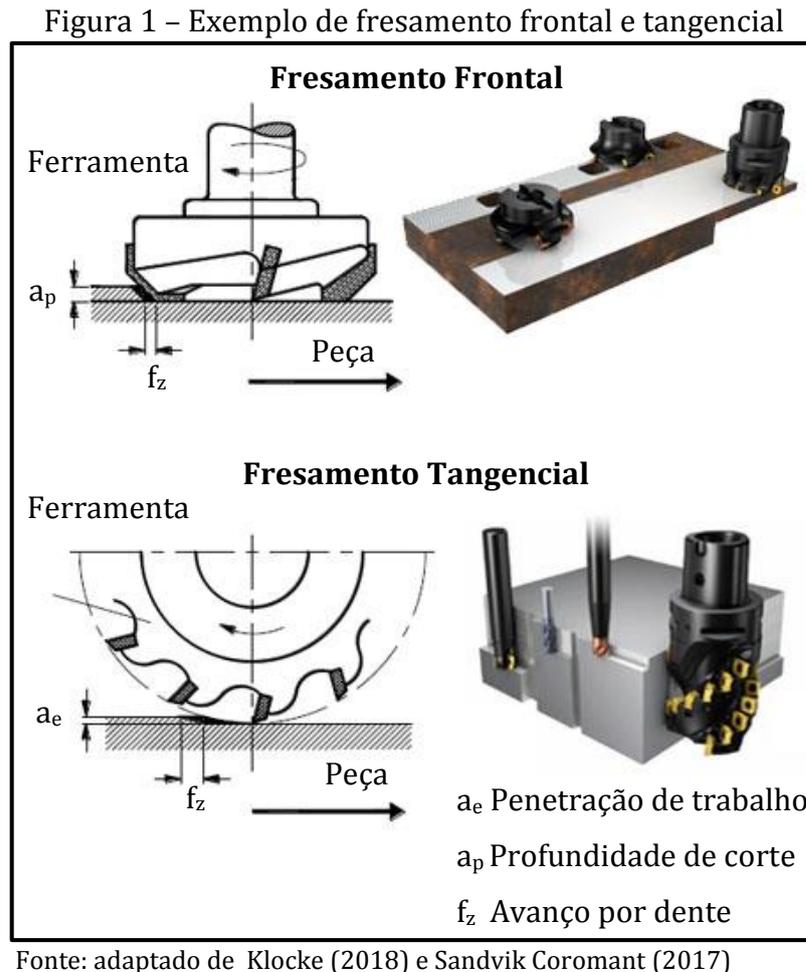
As ferramentas utilizadas trabalham de forma rotativa e são chamadas de fresas, estas, executam o corte do material devido serem construídas com arestas cortantes (gumes) dispostas simetricamente em torno de um eixo (STEMMER, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Existe uma infinidade de geometrias e formas construtivas para as fresas, um exemplo são as inteiriças, formadas por uma única peça e material, e as intercambiáveis, nos quais insertos fixados em um corpo de aço são utilizados na parte principal de corte, sendo substituídos conforme a necessidade (KLOCKE, 2018).

O processo de fresamento para Diniz, Marcondes e Coppini (2013), é classificado conforme o eixo-árvore da máquina-ferramenta, ocorrendo o fresamento horizontal, vertical ou inclinado. A outra classificação ocorre pela disposição das arestas

cortantes da fresa, distinguindo o processo por dois tipos básicos, conhecidos como o fresamento frontal e o tangencial (FERRARESI, 1970; STEMMER, 2005).

A Figura 1 ilustra os dois tipos de fresamentos básicos citados. As setas indicam o sentido de rotação da ferramenta usada no exemplo e o sentido de deslocamento da peça, direção de avanço, no momento da usinagem.



O fresamento frontal, representado na parte superior da Figura 1, gera superfícies planas perpendiculares ao eixo de rotação da fresa que possui gumes ativos na sua superfície da face (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Fresas para esse tipo de trabalho podem apresentar uma combinação de gumes localizados na face e na periferia da ferramenta (STEMMER, 2005).

O fresamento tangencial ou periférico, representado na parte inferior da Figura 1, gera superfícies planas paralelas ao eixo longitudinal da fresa que dispõe de gumes ao longo da sua superfície cilíndrica. Nesse processo, a largura de contato quando em

fresadoras de eixo horizontal, ou, a profundidade de trabalho ( $a_e$ ) quando em fresadoras de eixo vertical, é consideravelmente maior que a penetração de trabalho ( $a_p$ ) (FERRARESI, 1970; STEMMER, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Além dessa classificação básica, o fresamento pode ser subdividido de acordo com: a superfície gerada, que engloba diversos modelos de geometrias; a forma da ferramenta, que possibilita uma grande variedade de opções; e a cinemática, que envolve o movimento relativo entre fresa e peça, podendo ser no fresamento tangencial concordante ou discordante, esse último trazendo algumas vantagens em relação ao outro. Ainda na cinemática, também é considerada a forma de contato do gume junto à peça, do ponto de vista do impacto inicial, são conhecidas condições mais favoráveis para a execução do trabalho nessa questão, na qual busca evitar que a quina do gume inicie o contato de corte, evitando falhas prematuras (KLOCKE, 2018; STEMMER, 2005).

Uma característica particular do processo de fresamento é a questão dos gumes não permanecerem em constante ação como em outros processos, por exemplo o torneamento que executa corte contínuo, ocorrendo à interrupção do corte pelo menos uma vez a cada rotação do gume, além de variar a espessura do cavaco com avanço da ferramenta durante o corte do material (KLOCKE, 2018).

Essas variações durante o corte geram solicitações térmicas e mecânicas alternantes para o material que compõe a fresa. Devido à variação do corte, a distribuição de temperatura é irregular e, após a saída do gume da peça, pela alta rotação ocorre um rápido resfriamento. Esse evento cíclico pode gerar tensões e levar a trincas térmicas no gume. Com os impactos e variações de tensões sobre o gume no momento do corte, trincas por fadigas também podem ocorrer (STEMMER, 2005; KLOCKE, 2018).

Desta forma, na sequência é abordado o processo de fresamento relevante para desenvolvimento desse trabalho, bem como, a influência do desgaste na vida da ferramenta e no acabamento superficial da peça usinada.

### **2.1.1 Fresamento de topo**

De forma geral, o fresamento de topo é muito utilizado para obtenção de superfícies de formas livres. O processo é amplamente utilizado na indústria de moldes e

matrizes para a execução de rebaixos, cavidades ou bolsões e contorno de perfis, tanto para situações de desbastes como para acabamentos em peças (GROOVER, 2017).

Para atender a necessidade de trabalho, variadas formas construtivas de fresas são encontradas (REBEIKA, 2016). A Figura 2 demonstra alguns exemplos de fresas inteiriças, feitas de aço rápido ou metal-duro, bem como fresas de insertos intercambiáveis, feitos de metal-duro ou material cerâmico, apresentado junto ao suporte de aço que as acomoda.

Figura 2 – Modelos típicos de fresas topo



Fonte: adaptado de Serratools (2019)

O metal-duro é obtido através do processo de sinterização de carboneto de materiais refratários junto a outros metais, que juntos formam um corpo de alta dureza e resistência à compressão. Nas ferramentas de corte de precisão, as partículas duras são carbonetos de tungstênio, podendo haver outros carbonetos combinados, em um aglomerante que usualmente é o cobalto. A variação de proporções desses materiais permite variar as características mecânicas do metal-duro (substrato) dentro de uma classificação normalizada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

As fresas inteiriças são constituídas de uma única peça, executadas por usinagem através do processo de retificação, dando a forma e dimensões ao substrato para gerar então, a ferramenta de aplicação em usinagem. São de baixo custo inicial, sendo escolhidos para fresas de configurações especiais, casos de pequenas produções, e uso geral no setor de ferramentaria (STEMMER, 2005).

O fresamento de topo reto é um modo de fresamento classificado pela ferramenta utilizada, bem como é chamado, utilizando uma fresa que no lado frontal apresenta uma forma plana e, em alguns casos, com arestas de corte, essas, denominadas de gumes secundários (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; KLOCKE, 2018).

Esse tipo de processo, quando utilizado para fabricação de superfícies planas, gera a superfície de interesse através do seu gume secundário, mesmo ocorrendo à remoção efetiva de material pelo gume primário da fresa. Desse modo, devido à forma construtiva da ferramenta, o processo ocorre de forma combinada entre o fresamento frontal e tangencial de modo contínuo (KLOCKE, 2018).

Segundo Rodriguez (2009), para descrever uma ferramenta de corte de precisão, adota-se uma classificação em escalas, dividido em macrogeometria e geometria do gume. Esse último recebe uma subdivisão em mesogeometria e microgeometria.

#### 2.1.1.1 Macrogeometria de fresa de topo reto

As fresas possuem formas construtivas fundamentais na determinação da sua resistência contra as variações de carregamentos termomecânicos (RODRIGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014).

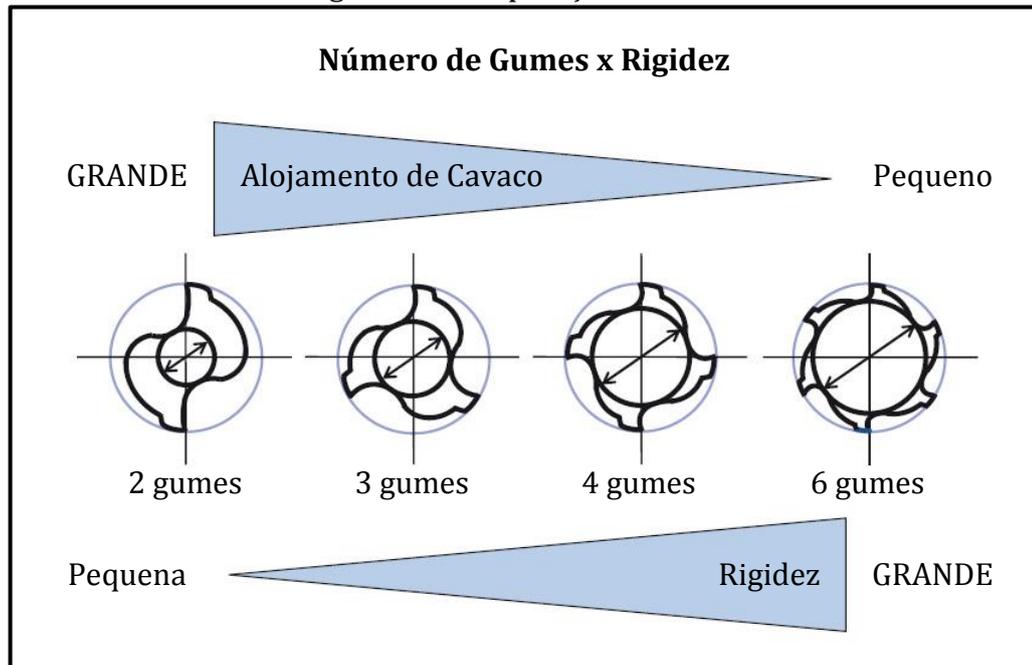
Na macrogeometria, a quantidade de gumes, quebra cavaco, dimensionais e ângulos principais caracterizam a ferramenta, que para uma mesma aplicação, apresentam variações dependentes do fabricante (RODRIGUEZ, 2009; KLOCKE, 2018).

As fresas de topo reto podem apresentar diferentes números e tipos de gumes. Podem ser citados gumes ao longo da superfície cilíndrica dispostos de forma reta ou helicoidal, o perfil do gume pode ser contínuo, para operações de acabamentos, ou perfilado (ondulado), para facilitar a quebra do cavaco em operações de desbaste. O número de gumes reflete na questão de alojamento e evacuação de cavaco, porém, em contra partida, influencia na dimensão do núcleo e rigidez da fresa, que quanto maior, menor será sua deflexão e propensão a quebras (REBEYKA, 2016; KLOCKE, 2018; OSG, 2019).

A Figura 3 ilustra diferentes perfis da face de fresas topo reto de mesmo diâmetro externo, variando o número de gumes e, conseqüentemente, o tamanho do

núcleo, representado por um círculo na parte central de cada perfil. A imagem também traz a relação dos canais entre gumes: para maior capacidade de alojamento de cavaco ocorre menor rigidez da fresa, situação indicada para desbastes; para uma menor capacidade de alojamento de cavaco ocorre maior rigidez, indicado para acabamentos.

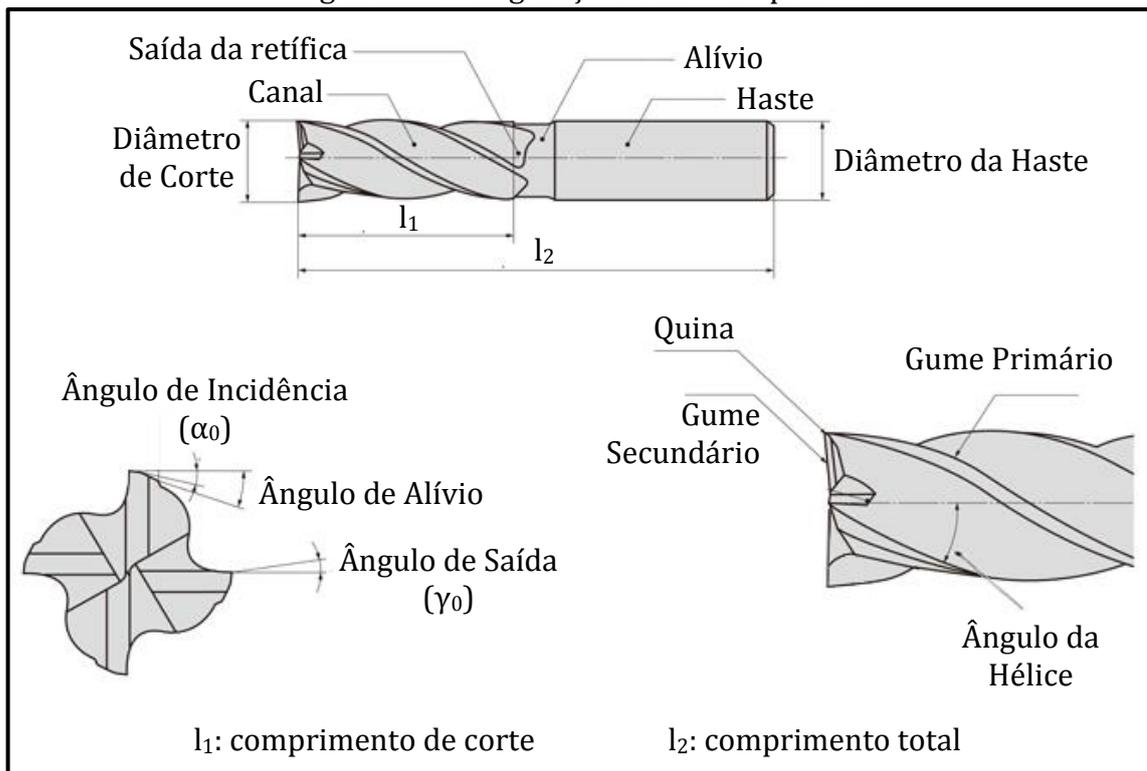
Figura 3 – Comparação de fresas



Fonte: adaptado de OSG (2019)

A Figura 4 traz uma fresa de topo reto e as principais partes que caracterizam sua construção geométrica. Na imagem, alguns ângulos recebem destaque por desempenharem funções importantes no trabalho da fresa. O ângulo de folga ou incidência ( $\alpha_0$ ), determinado entre a ferramenta e face cortada da peça, tem como função evitar o atrito entre esses dois corpos. Normalmente variando de 5 a 20 graus, o ângulo de folga não pode ser muito baixo para não prejudicar a penetração da cunha na peça, porém se muito elevado, reduz a resistência da cunha propiciando pequenas quebras. O ângulo de saída ( $\gamma_0$ ), determinado entre a superfície de saída do cavaco e o plano de referência, influencia na força e potência necessária de corte. Comumente variando de -8 a 20 graus, quanto mais elevado o ângulo de saída, menor será o trabalho de extração e escoamento para o cavaco, sendo que valores negativos são utilizados no corte de materiais de difícil usinagem ou quando ocorre o corte interrompido, garantindo maior resistência à cunha. O ângulo ( $\beta_0$ ) caracteriza a cunha de corte, ângulo entre face e flanco (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; FRACARO, 2017).

Figura 4 – Configuração de fresa topo reto



Fonte: adaptado de Rebeyka (2016)

### 2.1.1.2 Geometria do gume de fresa de topo reto inteiriça

A geometria do gume é analisada e subdividida em duas áreas: mesogeometria e microgeometria, definindo características da seção efetiva de trabalho da cunha de corte. Seguindo uma sequência escalar para caracterização do gume, a mesogeometria comporta detalhes na ordem de 1 a 100  $\mu\text{m}$  como o perfil geométrico e raio de arredondamento apresentado pela superfície de transição entre a face e o flanco da ferramenta (RODRIGUEZ, 2009).

Os formatos de gumes de modo geral, são definidos como afiado, arredondado e chanfrado. O formato afiado refere-se ao gume que não recebeu, em nenhuma etapa da fabricação ou pós-fabricação, uma preparação, sendo obtido por consequência da retificação da face e flanco da cunha de corte. Esse tipo de gume, na prática, não é definitivamente afiado, ele pode apresentar uma série de entalhes, microlascamentos e rebarbas, não existindo um parâmetro específico para sua descrição (REILLY; MCCORMACK; TAYLOR, 2004 apud DENKENA; BIERMANN, 2014). A união de diferentes raios e chanfros, ou ainda uma combinação dos dois, também é possível de ser

encontrada em gumes que recebem algum tipo de preparação (RODRIGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Um gume arredondado é comumente caracterizado por um arco de circunferência que se aproxima do perfil na ponta da cunha. Outra forma para melhorar a precisão de caracterização, devido à assimetria do raio na cunha, é estabelecer mais de uma circunferência para atender o perfil (RODRIGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014). Desta forma, com a variação do raio entre as faces da cunha, a caracterização também pode ser feita pela atribuição de vários pontos sobre o contorno do perfil, a fim de se obter uma função polinomial que se aproxime e descreva a curva correspondente ao gume (RODRIGUEZ, 2009).

Segundo Denkena e Biermann (2014), a precisão da representação da forma do gume por alto número de pontos será afetada pelo próprio algoritmo que faz o tratamento dos dados. Então, devido essa desvantagem na caracterização precisa de gumes assimétricos, Denkena et al. (2005 apud Denkena e Biermann, 2014) estabeleceram uma avaliação mais precisa para descrever o gume, chamado método do fator de forma ou método do fator K. Esse método considera medidas lineares para  $S_\gamma$ , referente ao segmento do gume na face de escoamento, e  $S_\alpha$ , referente ao segmento do gume no flanco, considerando o ponto de onde inicia o raio na face da cunha até um ponto máximo virtual se o gume fosse idealmente afiado. Através desses valores é mensurada uma variação média dos raios no gume ( $\bar{S}$ ), apresentado na Equação 1, e o fator de forma (K), que especifica a orientação do arredondamento sobre a cunha, apresentado na Equação 2.

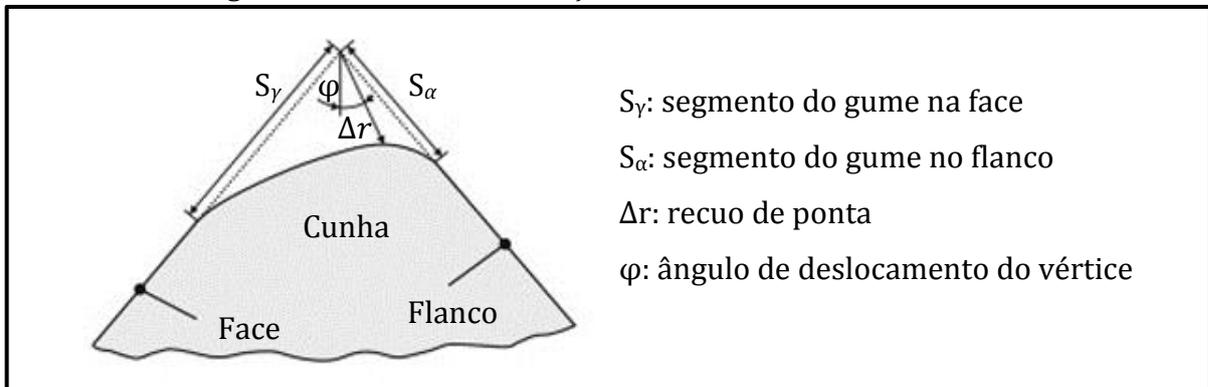
$$\bar{S} = \frac{S_\gamma + S_\alpha}{2} \quad (1)$$

$$K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha} \quad (2)$$

O fator de forma do arredondamento pode ser simétrico ( $K=1$ ), tender para o lado da face de escoamento de cavaco ( $K>1$ ) ou para o lado do flanco ( $K<1$ ). O recuo real ou diferença em relação a uma ponta totalmente afiada também é considerado ( $\Delta r$ ), junto a um ângulo ( $\varphi$ ) que indica a variação ou deslocamento angular do vértice para o perfil do gume arredondado (DENKENA et al., 2005 apud DENKENA; BIERMANN, 2014).

A Figura 5 traz a representação para avaliação através desse método junto aos parâmetros considerados para sua aplicação.

Figura 5 – Modo de verificação do método do fator de forma



Fonte: adaptado de Denkena et al.(2005 apud DENKENA e BIERMANN, 2014)

As fresas inteiriças normalmente possuem gumes na face frontal, esses denominados de gumes secundários, que efetivamente não executam o corte do material, mas no local onde o gume secundário se encontra com gume principal acaba sendo formada a quina da fresa. Quando gerada superfícies perpendiculares ao eixo da fresa, a quina tem papel importante na formação do cavaco e qualidade superficial da peça. Nos casos de microfresamento, em estudos científicos, a quina recebe uma atenção maior, sendo comumente caracterizado seu perfil entre o gume principal e secundário por um raio (BIERMANN; BASCHIN, 2009; OLIVEIRA et al., 2015).

Como citado no início desse capítulo, faz parte da caracterização do gume a microgeometria, comportando detalhes na ordem de até 2  $\mu\text{m}$ , admitindo as rugosidades ao longo e nas proximidades do gume e sua textura superficial. Essas características são originadas inicialmente pelo seu material, de forma natural, devido a sua obtenção através da metalurgia do pó, e também, pelo processo e todos os parâmetros que envolvem a fabricação da ferramenta, podendo ser citado: o rebolo utilizado, sentido de retificação, velocidades e profundidades de corte (RODRIGUEZ, 2012).

Os detalhes da microgeometria envolvem à topografia do gume, sendo de grande importância sua análise para os casos no qual a ferramenta receberá algum tipo de revestimento posterior à fabricação, além da questão no momento de trabalho, para definição do contato entre peça e fresa, como ocorrerá o fluxo de material e como se dará o comportamento de desgaste (KLOCKE, 2018).

Os entalhes apresentados ao longo do gume e as pequenas variações superficiais são avaliados através de perfis de rugosidades. Essa avaliação propõe uma comparação quantitativa da topografia obtida pela fabricação ou por uma preparação, possibilitando a evolução e qualificação dos processos envolvidos na produção da ferramenta (RODRIGUEZ, 2009).

A caracterização da superfície do gume envolve processos relativamente complexos de medição por métodos ópticos ou de contato que avaliam perfis paralelamente ao gume em plano ortogonal ao segmento de interesse (RODRIGUEZ, 2009). Segundo Denkena e Biermann (2014), técnicas multifocais e escaneamentos, que geram modelos 3D, possibilitam análises do gume e sua vizinhança. Várias outras técnicas são utilizadas, bem como imagens bidimensionais de maior precisão geradas por microscópio eletrônico de varredura (MEV). Entre essas técnicas existe divergências devido à precisão depender do operador, bem como, do mecanismo e sistema que rege o funcionamento do equipamento e trata os dados coletados.

## 2.2 PREPARAÇÃO DE GUME

Os avanços tecnológicos e a aplicação de novas estratégias de corte, na busca pelo aumento da produtividade e qualidade das peças, ocasionaram a necessidade de desenvolvimento de melhores ferramentas de corte, as quais suportassem extremas condições de trabalho (RODRIGUEZ, 2009).

Na parte construtiva da ferramenta, os substratos e as variações de geometrias tendem a evoluir juntamente com o alto desenvolvimento de revestimentos que vem ocorrendo nas últimas duas décadas, contribuindo para uma maior aplicação das ferramentas. Contudo, o desempenho geral da ferramenta é significativamente influenciado pela sua microgeometria (KLOCKE, 2018).

Cunhas com arestas de corte bem afiadas tem uma boa capacidade de corte, porém, como já mencionado por Fisher em 1897, gumes não são totalmente afiados, além de apresentarem defeitos como microlascamentos, ranhuras ou rebarbas provenientes do seu modo construtivo, que causam alta instabilidade da borda reduzindo a vida útil e aumentando o risco de falha prematura da ferramenta (DENKENA; BIERMANN, 2014; KLOCKE, 2018).

Com o avanço tecnológico, a busca em melhorar as ferramentas de corte e garantir uma melhor confiabilidade ao processo, refletiu em investigações, realizadas a fim de entender as forças envolvidas no processo de corte. Em 1960, Albrecht estudou a influencia de um gume arredondado e introduziu a partir deste, o mecanismo de recalque de material sobre a peça na teoria do corte de metais (RODRIGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014).

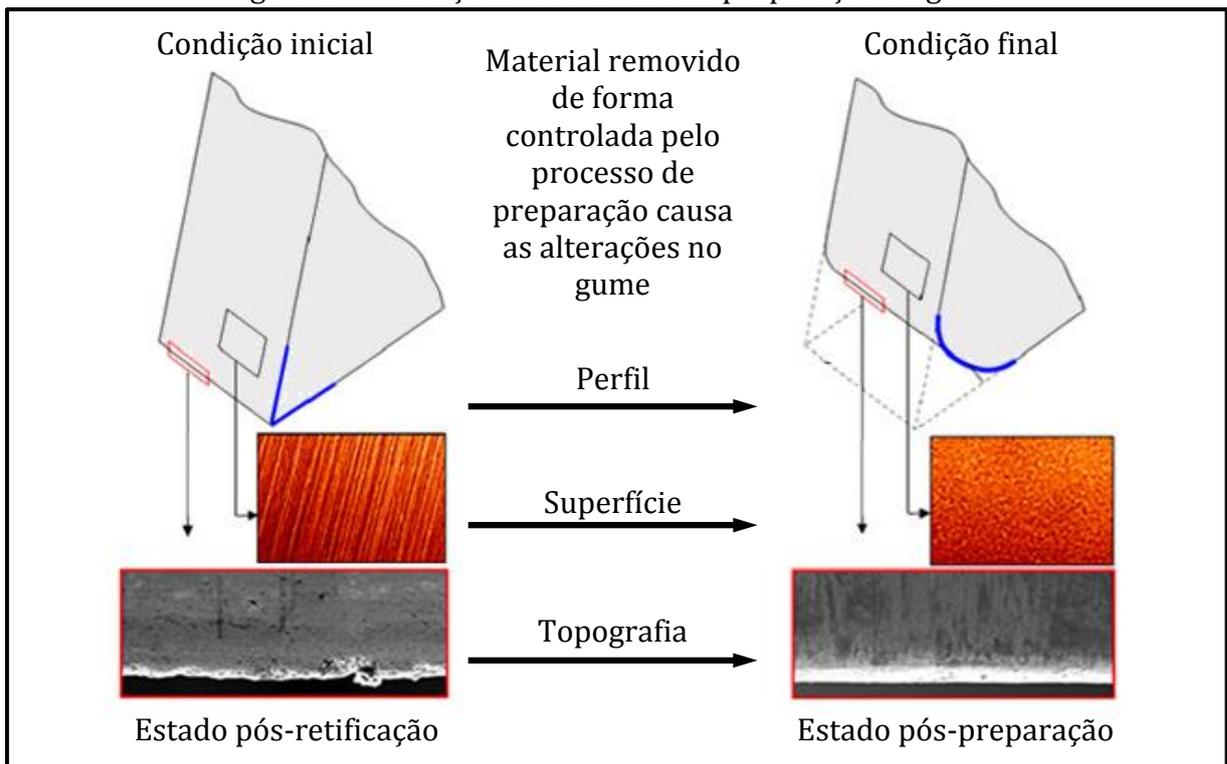
Desta forma, o tratamento ou preparação do gume executado antigamente de forma manual, retornou as investigações da época, interessantes resultados. Com o surgimento de novos materiais para serem usinados e o aporte de equipamentos que evoluem a cada ano, a preparação de gume passou a ser investigada mais frequentemente no meio científico e, recentemente, vem sendo altamente estudada devido à viabilidade comercial e grande número de benefícios para com a ferramenta e peça produzida (DENKENA; BIERMANN, 2014).

A preparação do gume consiste em uma pequena remoção de material do gume inicialmente no estado afiado, conforme Rodriguez (2009), gerando um novo perfil na ponta da cunha de corte, obtendo uma superfície convexa que faz a transição entre as faces de folga e de saída da cunha. O processo executado mudará, então, características da mesogeometria do gume e, por consequência, a microgeometria também será afetada, resultando na alteração de rugosidade das faces, bem como a sua textura, fator que contribui na aplicação de revestimento devido à possibilidade de melhora da adesão.

Após a preparação, defeitos iniciais são removidos e o gume apresenta maior homogeneidade superficial, aumentando a sua estabilidade contra os carregamentos termomecânicos, que resultam em desgaste, e esse, sendo controlado, leva a ferramenta a uma maior vida útil, convergindo para um processo de maior confiabilidade e qualidade (KLOCKE, 2018). A Figura 6 ilustra as mudanças obtidas no gume devido à preparação aplicada.

O conceito da mecânica do corte, normalmente atribuído, considera um gume afiado, onde a espessura de cavaco idealmente escoava através da face da cunha de corte, porém com o arredondamento ocorre a mudança de interação entre ferramenta, peça e cavaco. A preparação faz com que a distribuição de forças de corte, de temperatura, formação de cavaco e integridade superficial da peça sejam alteradas (RODRIGUEZ, 2009).

Figura 6 – Alterações resultantes da preparação de gume



Fonte: adaptado de Rodriguez (2009)

O arredondamento causa uma variação no ângulo efetivo de saída ( $\gamma_e$ ) devido à mudança do contato alterando a formação e fluxo de cavaco. Durante o corte haverá um ponto de separação (S) para o fluxo de material, acima desse ponto, assume-se que o material flui para o cavaco, logo abaixo, uma porção de material que não se deforma sofre o efeito de recalque, gerando a superfície recém-usinada. Esse comportamento conceitua um limite ou espessura mínima de cavaco ( $h_{min}$ ) que não é removido, sendo pressionado na direção da superfície da peça de trabalho e lateralmente além da ferramenta (BERGMANN et al., 2019).

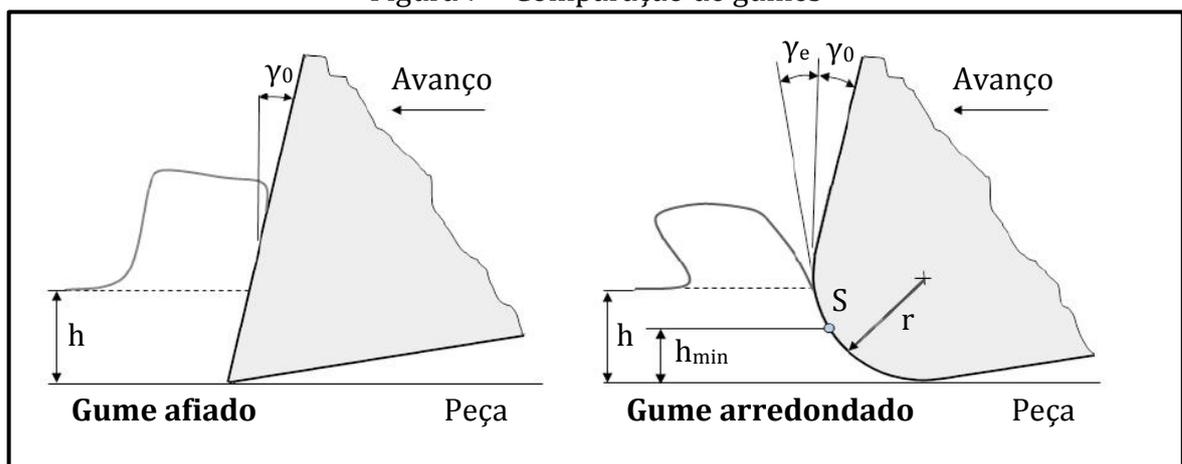
Estudos realizados por Bassett, Köhler e Denkena (2012), através do método de elementos finitos (MEF), retornaram que para gumes com arredondamentos de  $K > 1$ , uma pequena porção de material da peça a frente do gume, próximo ao ponto de separação, apresenta velocidade igual a zero até que flua para o cavaco. Esse fenômeno ocorre na chamada zona de estagnação, onde alta deformação plástica ocorre dando início a formação de cavaco. Isso pode ser visto e comprovado por Bergmann et al. (2019), após análise metalográfica da peça parcialmente fresada com gumes simetricamente preparados por escovação.

A força resultante do corte é distribuída na área de contato entre ferramenta e material a ser removido, conforme a ferramenta avança apenas uma porção da força de corte atua diretamente no gume. Na região do gume abaixo do ponto S, uma nova componente de força irá atuar no gume e flanco, não contribuindo para o corte. Isso explica o fato da energia específica de corte para remoção de cavaco ser maior para situações de ferramentas preparadas, nas quais baixos valores de espessura de cavaco deformado se tornam presentes (RODRIGUEZ, 2009).

Esses detalhes envolvidos com gumes preparados são fundamentais para questões de acabamentos e de grande influência na situação de microssinagem. Estudos teóricos e práticos, realizados por Son, Lim e Ahn (2004), concluíram que trabalhar em profundidades de corte na mesma grandeza da espessura mínima de cavaco retorna em melhor resultado de qualidade superficial quando utilizado ferramentas que tiveram os gumes preparados.

A Figura 7 traz um gume afiado e um arredondado de raio ( $r$ ) para ilustrar como ocorre o escoamento do cavaco para uma profundidade de corte ( $h$ ) devido à mudança de contato. Também é apresentado o ponto de separação de fluxo de material (S) e a espessura mínima de corte ( $h_{min}$ ) para um gume preparado.

Figura 7 – Comparação de gumes



Fonte: adaptado de Rodriguez (2009)

Conforme Klocke (2018) relata, até o momento uma grande variedade de técnicas foi desenvolvida na busca de processos que atendam as necessidades de uma preparação de gume. A existência de várias formas de execução ocorre devido à demanda, no caso a necessidade específica de cada aplicação, pois os estudos

desenvolvidos em todos esses anos comprovam que, de forma geral, uma ferramenta que passou por preparação terá grandes benefícios, porém, o melhor de uma ferramenta será obtido quando ela for preparada para atender um conjunto de parâmetros específicos para o corte de um determinado material. Isso faz com que as investigações em torno desse tema continuem ocorrendo (DENKENA; BIERMANN, 2014).

Os métodos mais comuns aplicados são a própria retificação usando rebolos para acabamento, usinagem por jato abrasivo, a laser, por descarga elétrica (EDM), acabamento por arraste em mídias abrasivas, polimento por abrasivos livres e escovação. Atualmente, conforme a aplicação da ferramenta e com a geometria do gume estimado, sabe-se qual processo atende melhor algumas necessidades de topografia e geometria requerida devido ao fato de que cada processo retorna em diferentes particularidades, tendo em vista às diferentes interações, levado em consideração as tolerâncias, reprodutibilidade e capacidade de produtividade para escolha do processo.

### 2.2.1 Processo de escovação

A escovação trata-se de um processo de usinagem por geometria de corte não definida. Devido sua robustez e custos relativamente baixos, é de ampla utilização industrial na remoção de pequenas quantidades de material, a fim de realizar acabamentos superficiais, executar rebarbação de peças usinadas e preparação de ferramentas para variados tamanhos de gume (RODRIGUEZ, 2009; BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012). As escovas são circunferenciais, basicamente divididas em rodas ou discos, fabricadas de aço, fibra natural ou filamentos de nylon, esse último, comumente usado em preparações e exemplificado na Figura 8 (STANGO, 1999; RODRIGUEZ, 2009).

Figura 8 – Escovas circulares de filamentos abrasivos



Fonte: adaptado SIT (2019)

Os filamentos de nylon são obtidos por extrusão, e cerca de 30 a 40% de seu volume é composto por grãos abrasivos, geralmente são usados carboneto de silício (SiC) ou óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), sendo esses os responsáveis por realizar a remoção de material da peça. O tamanho do grão, ou granulometria, possui uma faixa de variação e é usado para classificar as escovas abrasivas (STANGO, 1999; BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012). Além do tamanho de grão, em estudos científicos são avaliados o grau de dispersão de tamanhos e a probabilidade de aglomeração dos grãos, a fim de caracterizar a presença do abrasivo. Uma forma de análise é através da técnica de espalhamento de luz dinâmico, às vezes chamado de espalhamento de luz quase elástico (MATHAI; MELKOTE, 2012).

Uma limitação de uso das escovas de nylon é imposta pela temperatura durante o trabalho, devido à possibilidade de ser atingida a temperatura de fusão do filamento, ocasionando a deposição de nylon sobre a superfície escovada. Segundo Overholser, Stango e Fournelle (2003), e Bassett, Köhler e Denkena (2012), o ponto de fusão está na faixa de 210 e 225 °C respectivamente. Para evitar que a temperatura de trabalho atinja o ponto de fusão, estudos realizados por Stango (1999), aconselham a trabalhar com as escovas em velocidades de rotação inferiores a 13,20 m/s. Em escala industrial, na preparação seriada, para evitar o calor excessivo é realizado o processo umidificado por óleos que não degradem o filamento (KLOCKE, 2018).

Na interação entre escova de nylon e peça, as pontas e laterais em contato se rasgam, expondo os microabrasivos distribuídos aleatoriamente pelo filamento. Desta forma, velocidades baixas de rotação e maior engajamento da peça de trabalho resultam na eficácia da escova, devido ao mecanismo na remoção ser a abrasão. Escovas de filamentos metálicos removem o material através do impacto gerado, realizado por altas velocidades de rotação (SIT, 2019).

Na preparação de gume, outros fatores importantes são: o contato, envolvendo o ângulo de pressão e a profundidade de corte; o tempo do processo; e, se houver deslocamento sobre o gume, a velocidade de avanço. Nesse último caso, a velocidade e número de repetições resultam no tempo final de preparação (BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012). Devido as variáveis e inúmeras configurações e aplicações, muitas investigações foram e estão sendo realizadas para esse processo, então sabe-se que normalmente raios superiores a 20  $\mu m$  são obtidos (KLOCKE, 2018).

Segundo Bassett, Köhler e Denkena (2012), a preparação por escovação é ainda um processo iterativo para obter a geometria desejada. Grande parte dos estudos publicados desenvolveu o processo de escovação para arredondamento de gumes em insertos de metal-duro submetidos ao torneamento (RODRIGUEZ, 2009; DENKENA et al., 2010; WANG et al., 2011; VOPAT et al., 2017). Um estudo sobre a formação de cavaco em corte interrompido foi feito por Bergmann et al. (2019), no qual prepararam ferramentas com arredondamentos simétricos através de escovação assistida por robô.

Um dispositivo apresentado por Denkena, Garcíá e Basset (2008 apud DENKENA et al., 2010), foi desenvolvido para preparação de variadas microgeometrias de gume através da escovação. Devido à movimentação simultânea em cinco eixos entre a escova e ferramenta, é possível executar a preparação de insertos e também em determinadas fresas de topo. Além de variações de velocidades de corte e profundidade de contato, a variação da posição tangencial da escova junto ao gume e variação do ângulo de pressão, retornam em raios assimétricos, possibilitando inúmeros tamanhos e disposições de raios sobre a cunha, podendo ser executados diferentes fatores de forma em busca da microgeometria adequada para aplicação da ferramenta na usinagem.

### 2.3 USINABILIDADE

A usinabilidade é um termo utilizado para conceituar as propriedades de um material e como elas influenciam na capacidade de executar a sua usinagem. Diferentes materiais apresentam comportamentos distintos para a mesma execução de usinagem com remoção de cavaco, ocorrendo situações de grande facilidade de execução da operação, bem como, casos onde dificuldades aparecem atribuindo ao processo um nível maior de complexidade. Complicações acabam ocasionando um desgaste acelerado da ferramenta de corte, superaquecimento, empastamento de material, lascamento do gume, acabamento superficial ruim, aumento das forças de corte, entre outros (STEMMER, 1995; KLOCKE, 2018).

Para Stemmer (1995) e Klocke (2018), a usinabilidade pode ser avaliada a partir de critérios fundamentais de forma conjunta ou isolada. Geralmente os critérios considerados são: a vida da ferramenta, forças de usinagem, qualidade superficial da peça e formação de cavaco. Dentre os quatro critérios, apenas os três primeiros podem

ser mensurados quantitativamente, usualmente avaliados para definir o custo de usinagem realizado na indústria.

Conforme Denkena e Biermann (2014), na busca de otimização da usinagem, esses critérios são avaliados, investigados e ensaiados em busca de ferramentas de maior durabilidade, superfícies com melhor qualidade e processos estáveis. Desta forma, a preparação de gume visa atender essas necessidades e, nesse trabalho, a integridade superficial será avaliada junto à vida útil da fresa a partir dos desgastes ocorridos.

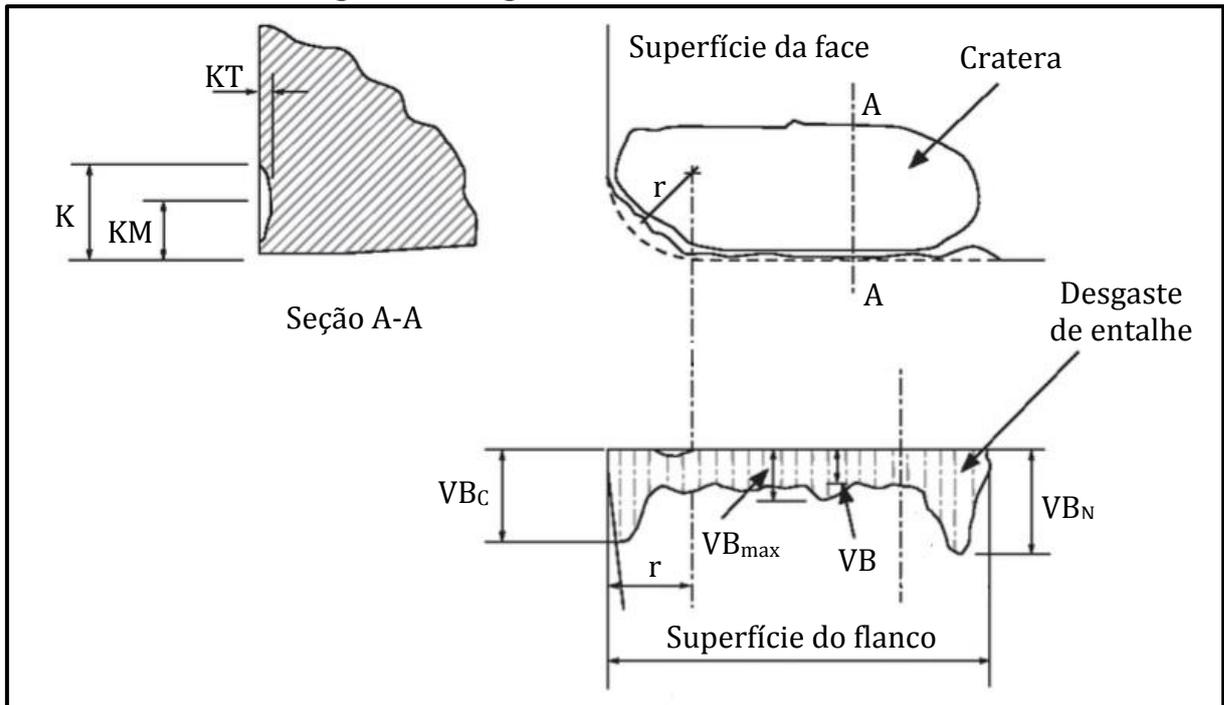
### **2.3.1 Desgastes em ferramentas de corte**

Durante o processo de corte, diversos tipos de desgastes e avarias podem ser gerados na ferramenta pelo fato do contato e escorregamento de material sob altas pressões e temperaturas, resultando na redução de eficiência de corte (STEMMER, 1995).

O desgaste em ferramentas é definido como a alteração da sua forma original devido à perda gradual do material que a compõe, acontecendo de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas, às vezes no nível atômico, às vezes no nível do grão do material. O desgaste ocorre devido a vários mecanismos, sendo que a temperatura durante o corte possui papel decisivo (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015). Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os tipos de desgastes são: frontal ou de flanco; de entalhe e de cratera. Os desgastes, de forma geral, são divididos por convenção, distinguindo em desgastes na face e os que ocorrem no flanco. A Figura 9 traz uma representação de uma cunha de corte com desgastes e suas formas de medições.

Na face da ferramenta pode ocorrer desgaste de cratera, caracterizado pela sua largura ( $K_B$ ), profundidade ( $K_T$ ) e distância do centro à aresta de corte ( $K_M$ ). Na superfície de folga ocorre o desgaste de flanco, sendo mensurada sua largura média ( $V_B$ ) e também largura máxima ( $V_{B_{max}}$ ). Junto a esse pode ocorrer o desgaste de entalhe, que ocorre na extremidade do desgaste de flanco, podendo ser medido sua largura ( $V_{B_N}$ ). Por fim, desgaste da ponta da ferramenta ( $V_{B_C}$ ) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 9 – Desgaste em ferramentas de corte



Fonte: adaptado de Machado, Abrão e Coelho (2015)

### 2.3.1.1 Desgastes e avarias gerados no fresamento

Devido às características do processo de fresamento, como o corte interrompido, geração de cavacos curtos, oscilações térmicas, oscilação de tensões sobre a cunha e variação de carregamento durante o corte, alguns defeitos ocorrem com uma frequência maior, enquanto outros ocorrem de maneira mínima, não sendo o principal responsável pelo fim da utilização da ferramenta. Assim ocorre para as avarias, que surgem principalmente devido ao corte interrompido.

Na sequência são apresentados os defeitos e avarias comumente ocorridos no fresamento, que contribuem e são utilizados para determinar o fim de vida de fresas.

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da cunha de corte devido ao contato entre ferramenta e peça. Sua ocorrência é muito comum, gerando uma marca na superfície do flanco que geralmente não é uniforme, sendo maior nos extremos da marca e próximo da quina. Esse desgaste provoca o recuo e modificação do gume devido à perda de material, fazendo com que a peça mude suas dimensões e no fim da usinagem não atenda as tolerâncias, além de apresentar um acabamento superficial inferior ao desejado. Desgaste de cratera é um desgaste que ocorre na superfície de saída devido ao atrito entre ferramenta e cavaco. Pode não ocorrer em ferramentas de metal-duro

revestidas e tem ocorrência mínima quando comparado ao desgaste de flanco no processo de fresamento (STEMMER, 1995; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Trincas são avarias que ocorrem na cunha da ferramenta de forma transversal ou longitudinal, oriundas de diferentes variações térmicas ou mecânicas. A solicitação alternante compressiva no fresamento leva a fadiga da cunha de corte, e no uso de metal-duro, pode levar a fissuras ou trincas transversais. As solicitações térmicas alternadas do corte interrompido e o uso de fluidos refrigerantes são capazes, para o metal-duro, de gerar trincas ou fissuras longitudinais ao gume (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; KLOCKE, 2018).

Lascamentos são avarias que, ao contrário do desgaste que remove pequenas partículas de material da ferramenta de forma contínua, removem partículas maiores de uma só vez. As principais causas são: a quina da ferramenta muito pequena e de material muito frágil; mau acabamento do gume; usinagem de materiais muito tenazes que caldeiam ou soldam facilmente no gume da ferramenta, e ao desprender-se, levam consigo micropedaços; além das oscilações termomecânicas e possíveis inclusões duras no material da peça (STEMMER, 1995; KLOCKE, 2018).

Mesmo a ferramenta possuindo condições mecânicas suficientes para evitar avarias, ela sempre estará sujeita ao desgaste. O tempo que a ferramenta trabalha efetivamente antes de ser substituída ou reafiada é denominado vida da ferramenta de corte. Para sua determinação, um critério deve ser adotado e controlado para especificar o fim de vida. Na usinagem, os desgastes em torno do gume seguem uma curva-padrão, representada na Figura 10, na qual o eixo ordenado mensura alguma forma de desgaste. Esse critério é o mais frequente utilizado na indústria a fim de manter a qualidade da produção de forma economicamente viável (STEMMER, 1995; MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

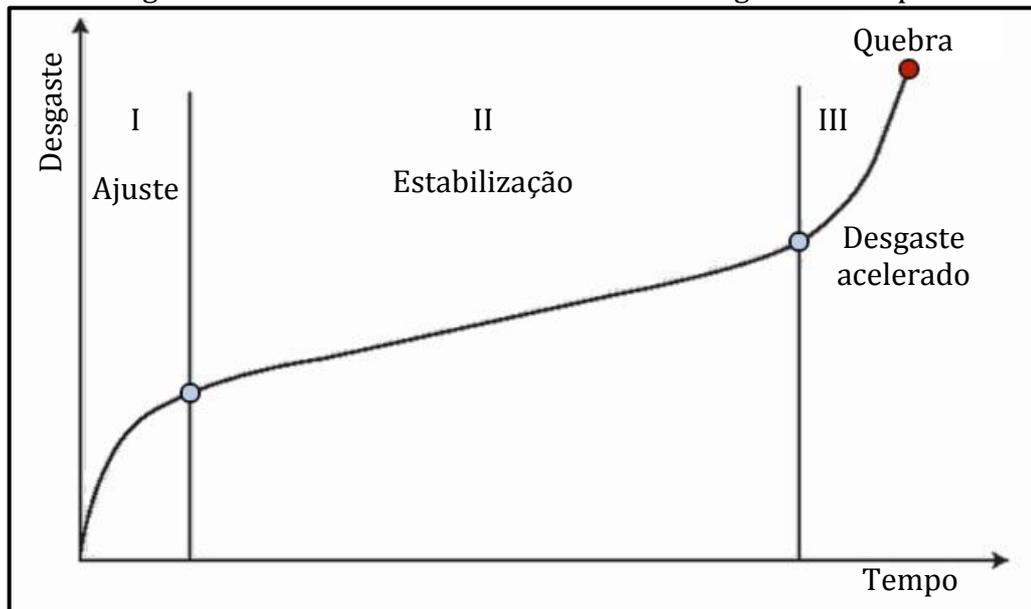
O desgaste ocorre e três diferentes estágios distintos podem ser observados (Figura 10). O Estágio I ocorre nos primeiros instantes do corte, apresentando um desgaste acelerado devido a questões tribológicas, como um ajuste do gume para a condição de corte envolvida, até a taxa de desgaste reduzir com o tempo. No Estágio II, a ferramenta encontra-se adequada ao processo e os desgastes ocorrem a uma taxa constante até a curva atingir uma nova inflexão.

O Estágio III inicia e o desgaste passa a ocorrer de forma acentuada num curto espaço de tempo. Com o desgaste em nível elevado, as tensões e altas temperaturas da

utilização de forma contínua da ferramenta resultarão eventualmente no seu colapso. Dentro do terceiro estágio, o tempo para que ocorra a quebra da ferramenta é curto, sendo às vezes impossível de ser estimado, por isso esse estágio deve ser evitado (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

Para o fresamento com ferramentas de metal-duro, a largura de desgaste de flanco é o valor controlado. A quebra da cunha pode ocorrer para valores de VB na ordem de 0,8 a 1,5 mm. Em operações de acabamento, o fim de vida de uma ferramenta deve ser muito antes que o desgaste atinja valores próximos à quebra do gume para que não comprometa a integridade superficial da peça. Desta forma, costuma-se não exceder o valor de 0,2 mm para a largura  $VB_{max}$  (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 10 – Curva de vida da ferramenta: Desgaste x Tempo



Fonte: adaptado Machado, Abrão e Coelho (2015)

### 2.3.1.2 Vida útil de ferramenta com gume preparado

De modo geral, a vida da ferramenta aumenta através da redução dos carregamentos mecânicos sobre a cunha, pois a vida limita-se aos sobre carregamentos, resultando em microlascamentos e quebras. A preparação de gume influencia os carregamentos termomecânicos e a estabilidade da cunha de corte, desta forma, como consequência, o comportamento de desgaste da ferramenta será alterado conforme a microgeometria do gume, e claro, devido os parâmetros de usinagem utilizados. O arredondamento simétrico permite que ferramentas preparadas atinjam uma maior

vida útil em relação as não preparadas. Microgeometrias com raios assimétricos sofrem comportamentos de desgastes de forma diferente, podendo melhorar ainda mais a vida da ferramenta (BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Os pequenos defeitos apresentados em ferramentas não tratadas colaboram para propagação de trincas e lascamentos no gume durante a usinagem. Testes executados por Bassett, Köhler e Denkena (2012), com insertos preparados por escovação e revestimento, atingiram o fim de vida estipulado, para desgaste de flanco máximo de 200  $\mu\text{m}$  sem apresentarem lascamentos, comportamento oposto aos insertos com ou sem revestimento e sem preparação, que apresentavam lascamentos esporádicos.

Com a variação do fator de forma para  $K < 1$ , raio tendendo ao flanco da cunha, o desgaste de flanco passa a ser dominante, pois com o maior segmento de raio nesse lado, aumenta o comprimento de contato resultando em maior fricção e cargas térmicas entre flanco e peça. Assim, o desgaste de flanco e vida útil de fresas está diretamente relacionado ao tamanho de segmento  $S_\alpha$ . Isso pode ser corrigido reduzindo essa medida através de gumes com fator de forma  $K > 1$ , no qual o segmento  $S_\gamma$  é maior, não sendo significativo para desgaste de flanco, porém contribuindo para desgaste de cratera que, no fresamento, ocorre em menores taxas (BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012; DENKENA; KOEHLER; REHE, 2012; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Conforme Denkena e Biermann (2014), o comportamento de desgaste deve ser conhecido para selecionar o arredondamento adequado, requerendo estudos para conhecimento do comportamento da ferramenta para dadas condições de trabalho. Desta forma, para o corte interrompido de AISI 1045 com arredondamento do gume tendendo para a face de saída, com segmentos  $S_\alpha = 30 \mu\text{m}$  e  $S_\gamma = 60 \mu\text{m}$ , retornaram na melhor estabilidade mecânica para o gume. Em uma fresa de metal-duro com único corte preparada por escovação Denkena, Koehler e Rehe (2012), concluíram que a melhora da vida para ferramenta usinando aço 42CrMo4 foi com  $S_\alpha = S_\gamma = 30 \pm 5 \mu\text{m}$ , obtendo 100 % de aumento de vida. Para usinagem de aços de alta dureza e abrasividade, maior vida útil pode ser obtida com arredondamentos tendendo ao flanco. No fresamento de canal em uma liga de titânio com fresas inteiriças de metal-duro Denkena, Leon e Köhler (2009) obterão uma melhora de 70% na vida da ferramenta utilizando um fator de forma  $k = 0,93$ , com segmento  $S_\alpha = 34 \mu\text{m}$  e  $S_\gamma = 31 \mu\text{m}$ . Outro

exemplo é apresentado por Fulemová e Řehoř (2015) no fresamento de acabamento, para um aço martensítico, utilizando um fator de forma  $k = 0,5$ .

### 2.3.2 Integridade superficial

O termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície e as camadas abaixo dela. Em usinagem, a condição final de uma superfície gerada envolve inúmeros fatores, podendo ser citados vibração, geração de calor, deformações plásticas, rupturas e tensões residuais. Desta forma, as alterações ocorridas podem ser classificadas avaliando a superfície, acabamento e as camadas internas da peça (subsuperfície) (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

O acabamento obtido por usinagem apresenta de forma combinada vários fatores que podem ser divididos em rugosidade, ondulações e falhas. Dessa forma, no projeto de uma determinada peça, sua fabricação deve ser planejada a fim de atender as necessidades de aplicação superficial (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; FRACARO, 2017).

A rugosidade é referente a pequenos desvios espaçados finamente, sendo uma característica própria de qualquer superfície. As ondulações são desvios de espaçamentos maiores que a rugosidade, provenientes de irregularidades e erros geométricos devido a vibrações, deflexões da ferramenta e tratamentos térmicos. A falha apresenta interrupções na topografia da superfície. Ondulações e falhas devem ser evitadas, pois são reconhecidos como erros, ao contrário da rugosidade que é inevitável e acaba sendo pré-estabelecida conforme a necessidade de aplicação da superfície usinada, levando em conta sua quantificação que deve ser feita de acordo com normas técnicas (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; FRACARO, 2017).

No fresamento, a superfície gerada apresenta ondulações relativas ao perfil do gume, bem como, a profundidade de corte e avanço da ferramenta. A altura dessa ondulação será a rugosidade resultante do processo. Desta forma, melhores resultados podem ser atingidos reduzindo a instabilidades da máquina, flexões e vibrações. Na parte da ferramenta, um gume arredondado de forma adequada à condição aplicada, retorna em rugosidades menores, reduzindo as marcas de avanço. A integridade do gume não deve apresentar defeitos como trincas e microlascamentos, ou então um

desgaste de flanco acentuado. Velocidades de corte maiores também contribuem para redução de rugosidades (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; FRACARO, 2017).

No fresamento de topo reto a rugosidade superficial também é influenciada pelo avanço da ferramenta e pela sua quina. Através da combinação de baixos valores de avanço e grandes arredondamentos para quina, teoricamente geram pequenas rugosidades superficiais. Com o aumento do raio do gume ocorre o aumento da espessura de cavaco não deformado ( $h_{min}$ ), aumentando o volume de material que é pressionado sobre a superfície da peça e deslocado para além da ferramenta, aumentando a rugosidade superficial e as rebarbas (DENKENA; KOEHLER; REHE, 2012; MAISS; GROVE; DENKENA, 2017).

Na região do  $h_{min}$ , o material da peça não é cisalhado e conduzido pela face da cunha para compor o cavaco, e acaba sofrendo uma deformação elasto-plástica, que varia conforme o tipo de arredondamento. A variação do fator de forma  $K$  do gume faz com que varie a razão de material da peça deformado elasticamente e plasticamente. Com raio de  $K < 1$ , ocorre o aumento do segmento  $S\alpha$ , da espessura  $h_{min}$ , da tensão normal empregada sobre a peça pela cunha de corte e o volume de material deformado plasticamente. Para raios de  $K > 1$ , o segmento de contato entre cunha e peça diminui, reduzindo a tensão normal e a razão do material deformado plasticamente. Desta forma, a preparação do gume deve ser selecionada cuidadosamente para que melhore a rugosidade superficial, tendo em mente que essa depende também do desgaste da ferramenta, que juntamente é influenciado pela preparação do gume. Resultados de estudos trazem que um aumento do raio de forma simétrica ( $K=1$ ) aumenta a rugosidade da superfície pelo fato de ocorrer espessuras de  $h_{min}$  maiores. Arredondamentos assimétricos influenciam as tensões ao longo da cunha e sobre a superfície e subsuperfície da peça, portando, com maiores deformações plásticas do material, a rugosidade superficial é reduzida no uso de gumes com um fator de forma  $K < 1$ . No fresamento de topo reto essa condição de arredondamento deve ser considerada para a quina de corte (DENKENA; BIERMANN, 2012; DENKENA; KOEHLER; REHE, 2012; MAISS; GROVE; DENKENA, 2017).

A superfície gerada também pode ser avaliada de forma qualitativa através de sua aparência, considerando características vistas a olho nu, assim a textura compreende a microgeometria da superfície, e essa, engloba a ondulação e rugosidade superficial (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; BET, 1999).

### 3 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão abordadas as metodologias para realização dos ensaios experimentais, juntamente com os equipamentos, ferramentas e materiais utilizados.

As atividades foram desenvolvidas junto ao GUS nas dependências da UCS, utilizando equipamentos disponíveis no Laboratório de Usinagem, sala 114, bloco D.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DE EXECUÇÃO

Conforme descrito nos objetivos, esse trabalho buscou investigar a preparação de gume por escovação realizada pelo grupo de pesquisa em usinagem da Universidade de Caxias do Sul.

Após a primeira etapa, envolvendo a pesquisa sobre preparação de gume feita por escovação, relações entre as publicações revisadas foram realizadas a fim de elaborar uma proposta inicial para parâmetros de escovação através dos discos abrasivos na busca de arredondamentos levemente deslocados para a face da cunha de corte. As execuções e avaliações foram feitas em duas ferramentas fabricadas especialmente para o teste de escovação. De forma iterativa, conforme avaliação dos resultados gerados pelos parâmetros iniciais, novos parâmetros foram propostos e executados para melhorar o resultado do processo.

Com os parâmetros estabelecidos no teste de escovação para o arredondamento julgado como adequado, a escovação foi realizada em 2 fresas de topo reto que foram submetidas a teste de usinabilidade com acompanhamento de desgastes. Após atingirem o fim de vida determinado, este foi comparado com a vida útil da fresa usada no seu estado original sem preparação, e avaliado se a preparação realizada melhorou a vida útil das fresas e retornou em superfícies usinadas com valores de rugosidades menores que as obtidas pela mesma fresa sem preparação de gume.

Na sequência, o Quadro 1 mostra a relação do ensaio experimental dividido em teste de escovação e usinagem, as variáveis de cada uma dessas etapas e avaliações que foram realizadas. Nos próximos capítulos, é tratado com maiores detalhes como ocorreu o ensaio experimental.

Assim, os resultados servirão para fomentar dados à execução dessa forma de escovação em desenvolvimento pelo GUS.

Quadro 1 – Relação do ensaio experimental

Ensaio	Variáveis	Parâmetros	Avaliações
Teste de Escovação	Abrasivo	Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub> e SiC	Raio do gume
	Rotação do disco [rpm]	6.000 e 10.000	Perfil do gume
	Profundidade de contato [mm]	1, 2, 2,5, 3 e 3,5	Superfície de transição entre face e flanco
	Inclinação entre face e gume [°]	0, 5, 15 e 25	
Teste de Usinagem	Fresa ORI	Condição do gume pós-retificação sem preparação	Desgaste de flanco da fresa
	Fresa ESC	Condição do gume pós-retificação e pós-preparação através de escovação	Rugosidade superficial gerada Textura superficial gerada

Fonte: o autor (2019)

### 3.2 TESTE DE ESCOVAÇÃO

O processo de preparação realizado pelo GUS utiliza como escova, folhas de acabamento superficial Scotch-Brite™ 3M, composta de uma manta não tecida constituída de fibras sintéticas de nylon, que comportam microabrasivos através do uso de uma resina à prova d'água. Existe uma variedade de folhas classificadas conforme a granulometria e tipo de abrasivo. Esse produto é facilmente encontrado em lojas de ferragens e materiais para construção com baixo custo de aquisição, sendo amplamente utilizada em limpeza e acabamento de variadas superfícies. As folhas utilizadas nesse trabalho são apresentadas no Quadro 2, conforme informações do fabricante.

Quadro 2 – Especificação das folhas de acabamento superficial

Abrasivo	Granulometria	Classificação	Nome comercial
Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	320	Muito Fina	AMF
SiC	400	Super Fina	SSF

Fonte: adaptado de 3M (2019)

Para a preparação de gume, essas folhas são recortadas em discos de 25 mm de diâmetro e furadas ao centro para serem fixadas por um parafuso M6 em um suporte de aço, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Folhas de acabamento Scotch-Brite™ e discos recortados

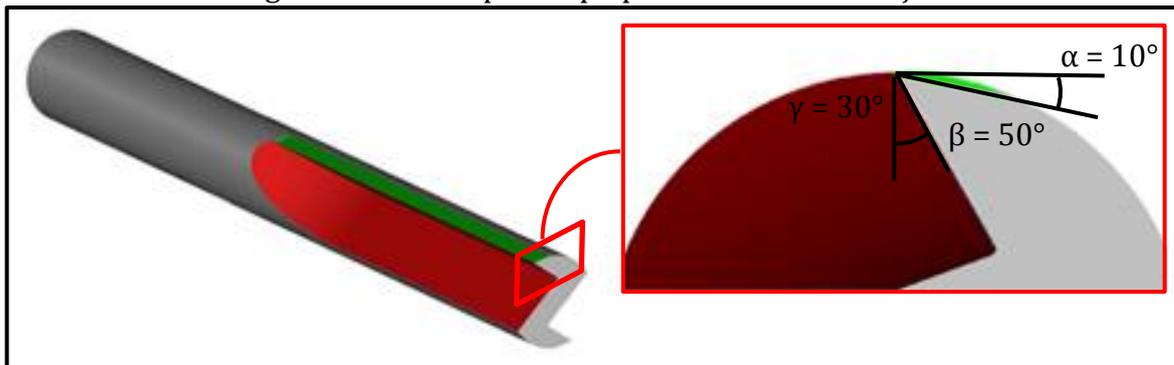


Fonte: adaptado de 3M (2019)

O suporte é fixado por pinça em uma miniretífica pneumática da marca Campbell Hausfeld, modelo TL102002, que pode operar a 25.000 rpm quando a 6,21 bares de pressão. A miniretífica foi fixada na mesa de trabalho de um centro de usinagem através de uma morsa.

Uma ferramenta protótipo foi projetada, e três foram fabricadas com o mesmo material e, geometria de cunha próxima a da fresa principal utilizada nos testes de fresamento, porém, esta possui ângulo de hélice igual a zero e apenas dois gumes para facilitar a execução do teste de escovação. Fabricada com comprimento total de 100 mm, sendo 70 mm de gume e o restante compondo a haste para fixação. A Figura 12 traz a representação da proposta de fresa utilizada no teste de escovação juntamente com a ampliação de uma das cunhas com os valores dos ângulos envolvidos.

Figura 12 – Fresa protótipo para teste de escovação

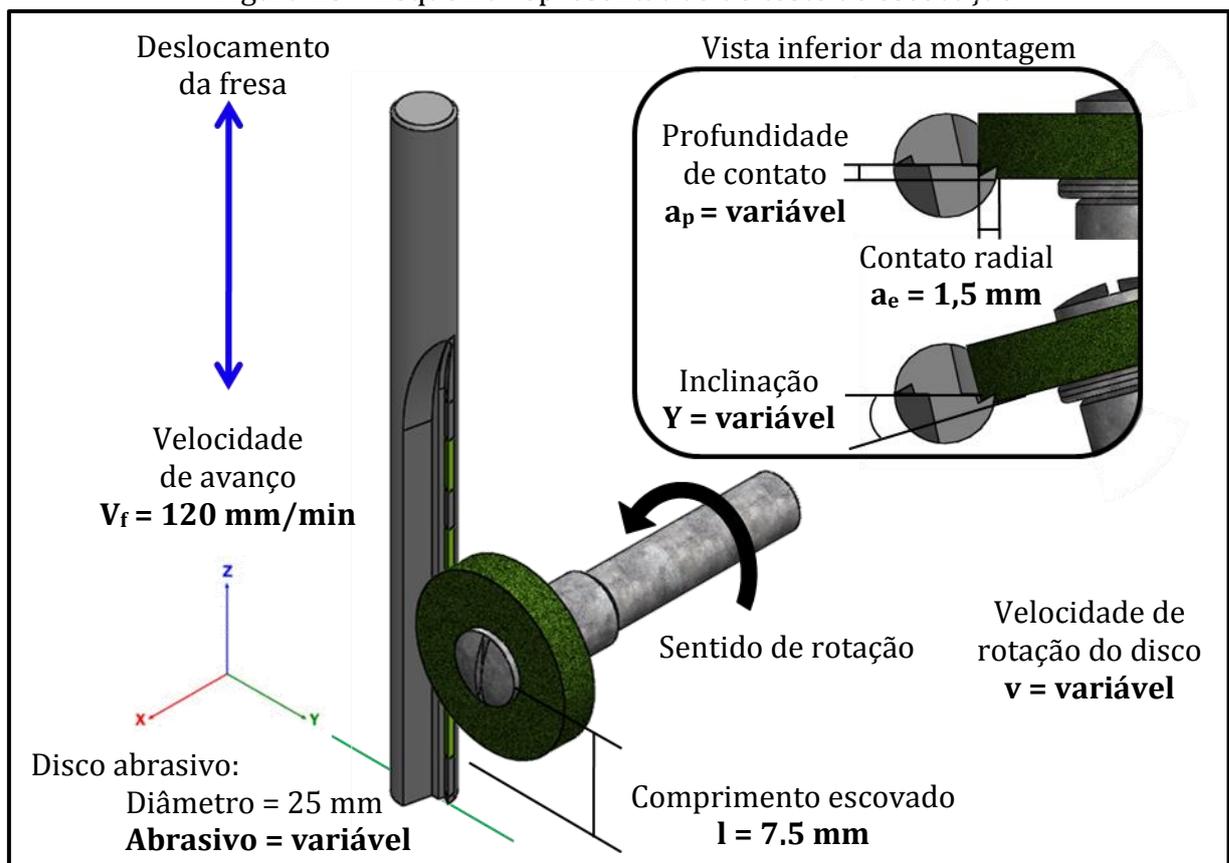


Fonte: acervo de imagens GUS (2019)

Com essa ferramenta, a proposta foi rotacionar o disco abrasivo através da miniretífica. As rotações utilizadas foram menor ou igual a 10.000 rpm (Quadro 1), conforme indicação da literatura a fim de evitar temperaturas de trabalho próximas a de fusão da fibra de nylon. Foi verificada a rotação através do tacômetro a laser da marca Exttech Instruments, modelo 461920, e os ajustes foram através do controle de vazão do conjunto preparador de ar localizado no laboratório, junto ao centro de usinagem.

Com essa estratégia cada cunha da ferramenta pode ter 4 áreas para diferentes preparações, sendo possível 8 execuções em cada ferramenta. Essas regiões são nomeadas com as letras A, B, C e D no sentido da quina para haste. Junto à letra também se usa os número 1 e 2, referentes ao gume da ferramenta. A Figura 13 mostra uma representação esquemática da execução do teste de escovação juntamente com a indicação dos parâmetros variáveis e constantes adotadas.

Figura 13 – Esquema representativo do teste de escovação



Fonte: o autor (2019)

A escovação foi realizada através do movimento axial do cabeçote do centro de usinagem, onde é fixada à ferramenta, movimentos de descida e subida alternados,

fazendo o disco abrasivo percorrer o gume por 7,5 mm, a um avanço de 120 mm/min, dessa forma o disco percorreu a extensão por 16 vezes, durante 60 segundos. O disco foi aproximado da ferramenta radialmente com uma interferência, ou contato radial de 1,5 mm, e a escovação realizada pela face do disco.

A imagem anterior foi obtida através do modelamento e montagem dos componentes via *software CAD*. Essa etapa foi necessária para simular as áreas de escovações e poder visualizar o contato entre a face do disco e gume, além de retornar as coordenadas de deslocamento da fresa em relação ao disco após o zeramento.

Nesse trabalho foram propostas combinações distintas entre os parâmetros de escovação, visando arredondamento de gume tendendo para a face da cunha de corte, que segundo algumas fontes apresentadas no capítulo 2, melhora a vida útil de fresas.

Esse estudo foi realizado de forma iterativa, um conjunto de parâmetros iniciais foram estabelecidos, executados e avaliados através de imagens MEV e perfilometria. Com os resultados gerados, nova combinação foi proposta na busca de melhorar o arredondamento gerado na fase anterior. Esse procedimento repetiu-se por mais duas vezes, totalizando quatro fases e 15 configurações executadas no teste de escovação, resultando no uso de duas fresas protótipo. A Tabela 1 apresenta as 4 fases e as 15 configurações realizadas com as respectivas combinações de parâmetros utilizados.

Tabela 1 – Configurações do teste de escovação

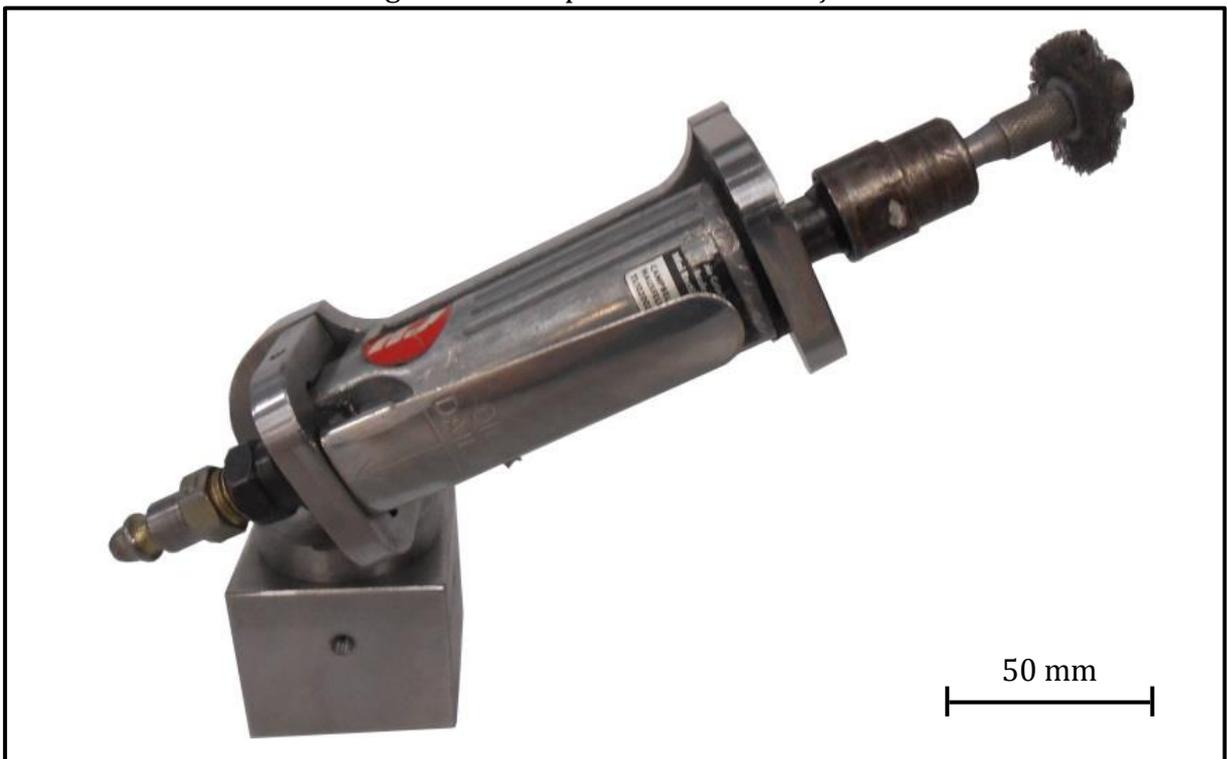
Configurações		Abrasivo	Inclinação da face do disco	Velocidade de rotação	Profundidade de corte
Fase	Número	Classe	Y [°]	v [rpm]	a <sub>p</sub> [mm]
1	1	Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0	10.000	2
	2	SiC	0	10.000	2
	3	Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	5	10.000	3,5
2	4	Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0	10.000	3,5
	5	Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0	6.000	3,5
	6	SiC	0	6.000	3,5
	7	SiC	5	10.000	3,5
3	8	SiC	15	6.000	3
	9	Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	15	6.000	3
	10	Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	25	6.000	3
	11	SiC	25	6.000	3
4	12	Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	15	6.000	2,5
	13	SiC	15	6.000	2,5
	14	Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	15	6.000	1
	15	SiC	15	6.000	1

Fonte: o autor (2019)

Após análise dos arredondamentos obtidos, aquele que retornou em uma situação de gume próxima a adequada para o processo de fresamento empregado foi utilizado para uma última fase do teste de escovação, agora com a fresa principal de trabalho. Foi prevista a necessidade de um dispositivo para fixação da miniretífica sobre a mesa de trabalho da fresadora que possibilitasse a execução dos posicionamentos necessários para realizar o melhor contato entre face do disco abrasivo e gume da fresa a partir da configuração selecionada.

A Figura 14 mostra o dispositivo projetado. Esse permite a fixação da retífica e combinações de posicionamentos para ajustes como: o alinhamento da face do disco com o ângulo de hélice da fresa; inclinações em relação a face do disco e cunha de corte, proporcionando ajustes para obtenção dos arredondamentos.

Figura 14 – Dispositivo de escovação



Fonte: o autor (2019)

### 3.3 TESTE DE USINAGEM

Ensaio de longa duração foram realizados, submetendo ao trabalho de fresamento, fresas inteiriça de metal-duro original sem preparação e outras preparadas conforme parâmetros determinados no teste de escovação.

As fresas foram utilizadas até atingirem desgaste pré-determinado,  $VB_{\max} = 0,2$  mm e/ou microlascamentos.

Tanto os desgastes gerados, quanto a qualidade superficial obtida com as fresas preparadas, são comparados com os mesmos dados gerados na utilização da fresa original sem nenhum tipo de preparação de gume.

O comportamento de desgaste e vida da fresa original e escovada foi obtido através da verificação de dados gerados através da réplica do teste de usinagem.

Fazendo parte da linha de pesquisa do GUS, esse trabalho utilizou parâmetros para o teste de fresamento definido em ensaios experimentais anteriores executados pelo grupo a fim de poder ser estabelecidas condições de comparação entre os estudos realizados.

O fresamento de topo reto foi realizado com estratégia de corte concordante, sem utilização de fluidos lubrificantes, para que o desgaste da ferramenta ocorra devido os parâmetros de usinagem, combinados com a condição do gume preparado e pelas propriedades dos materiais.

A seção de corte ocorreu para uma profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5 mm e profundidade radial ( $a_e$ ) de 0,2 mm ao longo de 252 mm do corpo de prova. A velocidade de corte ( $v_c$ ) utilizada foi de 180 m/mim com um avanço ( $f_z$ ) de 0,05 mm/gume.

A cada 20 passagens da ferramenta ao longo do comprimento do corpo de prova, 5040 mm lineares eram usinados. Esse foi o intervalo utilizado para verificação e medição dos desgastes de flanco apresentados nos quatro gumes das fresas. Isso foi repetido até atingirem o fim de vida determinado para o experimento.

Os testes de fresamento foram desenvolvidos em um centro de usinagem Hartford, modelo LG-500, de potência e rotação máxima de 10 kW e 10.000 rpm.

### 3.4 FRESA DE TOPO RETO

As fresas utilizadas são inteiriças de metal-duro classe K40, sem revestimento e com gumes não preparados pelo fabricante. O diâmetro de corte e da haste são 6 mm, o comprimento total ( $l_2$ ) de 80,5 mm, sendo que o comprimento de corte ( $l_1$ ) é de 30 mm. A fixação foi através de um mandril de fresamento de alta potência da marca Seco Tools, modelo BT40ADB-PMC20-065, utilizando luva de redução 20 para 6 mm. A montagem ocorreu para uma razão de comprimento por diâmetro ( $l/d$ ) igual a 3.

As fresas apresentam 4 gumes de corte dispostos ao longo da superfície cilíndrica, com ângulo de hélice de 30°. O ângulo de cunha ( $\beta$ ) é 72°, ângulo de folga ou incidência ( $\alpha$ ) de 10° e ângulo de saída ( $\gamma$ ) de 8°. A Figura 17 apresenta umas das fresas utilizadas e a montagem no mandril de fresamento utilizado.

Figura 15 – Fresa e mandril de fresamento



Fonte: o autor (2019)

### 3.5 CORPO DE PROVA

O material utilizado para os testes de usinabilidade com as fresas foi o aço AISI P20, termicamente tratado apresentando dureza de 35-37 HRC. Sua composição química é apresentada na Tabela 2, com valores para a média de três medições obtidas através da análise de composição química.

Tabela 2 – Composição química aço AISI P20

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Teor (%)	0,409	0,377	1,462	0,022	0,384	2,033	0,201	0,716
Elemento	Co	Cu	N	Ti	V	W	Al	Fe
Teor (%)	0,108	0,119	0,026	0,004	0,049	0,088	0,012	93,983

Fonte: laudo técnico UCS (2019)

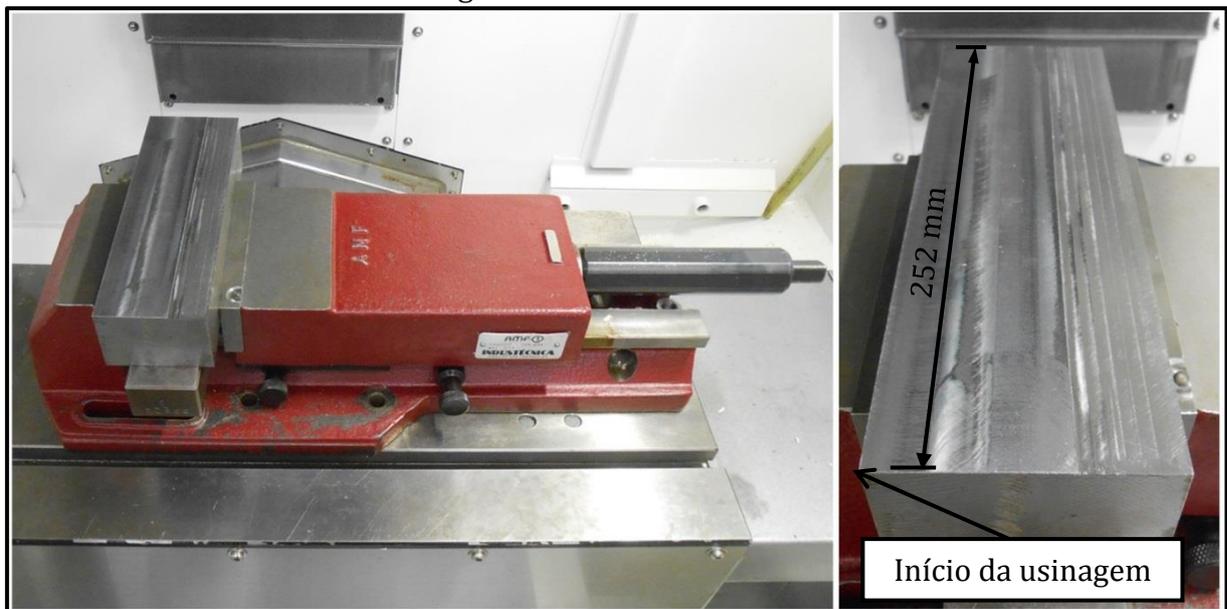
Esse material é de alto consumo na região pela indústria de moldes e matrizes, com utilização frequente em operações de fresamento, último processo de geração de forma antes da realização, se necessário, de polimento e/ou texturização.

Os parâmetros utilizados no teste de usinagem são utilizados em uma situação de acabamento em fresamento, simulando a última operação em máquina sobre a peça.

Os blocos desse material possuem faces retificadas com comprimento de 252 mm e largura de 80 mm, as espessuras dos blocos variaram entre 50 e 55 mm, devido outros ensaios com eles executados. Para os testes, dois corpos de prova foram utilizados de forma alternada para executar o desgaste das fresas e manter a superfície usinada para registro de rugosidades e textura no início e no fim da usinagem.

A Figura 18 apresenta um dos blocos utilizados e a fixação através de uma morsa sobre a mesa de trabalho do centro de usinagem.

Figura 16 – Bloco AISI P20



Fonte: o autor (2019)

### 3.6 VARIÁVEIS AVALIADAS

No teste de escovação, cada preparação foi avaliada qualitativamente através do microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo, marca Tescan, modelo Mira 3, a fim de verificar a qualidade superficial e suavidade da superfície gerada na transição entre face e flanco. A avaliação do perfil foi através de técnica de contato pela estação de medição de contorno Mahr, modelo MarSurf CD 280, movimentando a ponteira (Vt) a

0,20 mm/s por um perímetro (Lt) de 2 mm, coletando 2000 pontos de posição para gerar o perfil.

No teste de usinagem, o corpo de prova usinado foi avaliado através de 5 medições de rugosidade, utilizando o *cut-off* de 0,8 mm e os critérios  $R_a$ ,  $R_z$  e  $Rz1_{max}$ , junto a imagens de textura, tanto para o início quanto para a região que ocorreu o fim de vida da ferramenta. As rugosidades foram obtidas pelo rugosímetro portátil da marca Mitutoyo, modelo SJ-301, com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$ , com raio de ponta do apalpador de diamante de 5  $\mu\text{m}$  e coincidência de 90°. As texturas foram obtidas por imagens através do estereoscópio trinocular de medição universal Entex, modelo TNE-10B.

O critério de fim de vida da ferramenta, que irá determinar o fim do teste de usinagem foi o desgaste de flanco máximo, calculando a média entre os 4 gumes, de 0,2 mm ou microlascamentos. O desgaste foi constantemente acompanhado através de imagens com 30 vezes de aumento realizadas pelo microscópio ótico Nikon, modelo Epiphot 200, e medido com o *software* ScopePhoto a cada 5040 mm usinados, referente a 20 passagens da fresa ao longo do comprimento do corpo de prova.

## 4 RESULTADOS

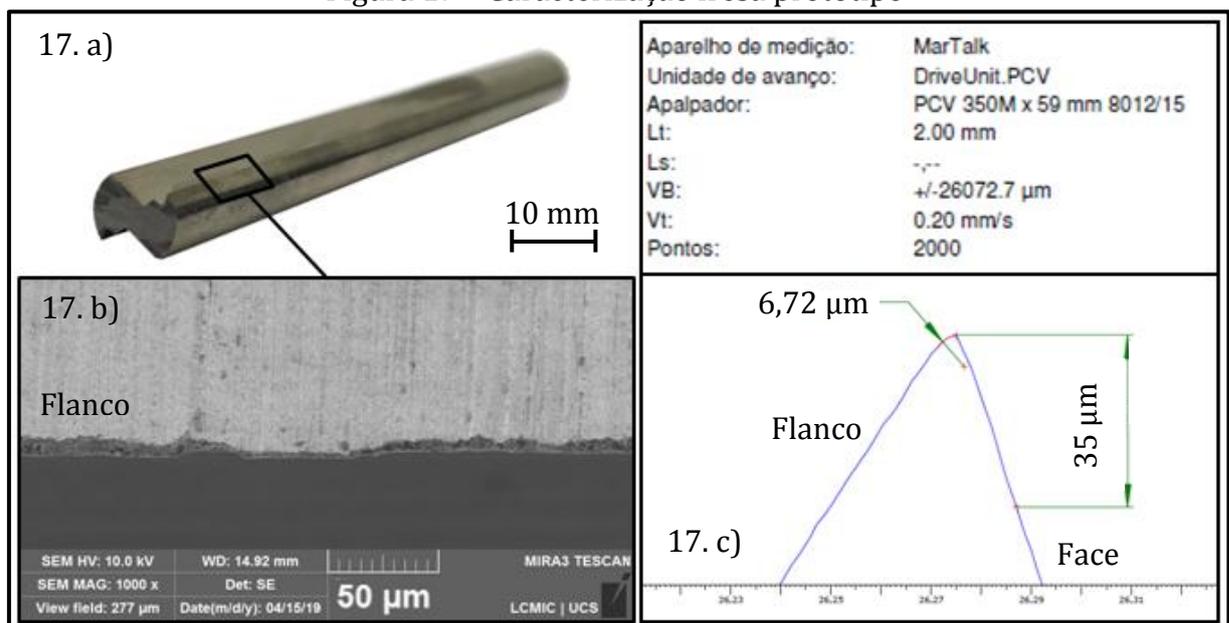
Nesse capítulo são apresentados e discutidos os arredondamentos obtidos no teste de escovação com as fresas protótipo, os resultados e comparações referentes à vida útil da fresa inteiriça topo reto preparada em relação a original. Também será avaliada a qualidade superficial obtida por ambas as fresas e avaliado as relações desses resultados com a preparação de gume aplicada.

### 4.1 TESTE DE ESCOVAÇÃO

Após a pesquisa sobre o processo de escovação aplicado à preparação de gume, foi possível coletar alguns valores de parâmetros apresentados em artigos e teses. A proposta inicial de parâmetros para aplicação da escovação com folhas de acabamento superficial foi determinada visando um raio simétrico ou, tendendo à face de escoamento.

Com a definição da utilização de uma ferramenta com gume disposto ao longo da superfície cilíndrica de forma linear, foram fabricadas 3 ferramentas protótipo nomeadas como P1, P2 e P3. Uma das ferramentas, no caso a P1 (Figura 17.a), o gume gerado pelo fabricante foi preservado e caracterizado, apresentado na Figura 17.b através de uma das imagens MEV e Figura 17. C pelo perfil de cunha obtido.

Figura 17 – Caracterização fresa protótipo

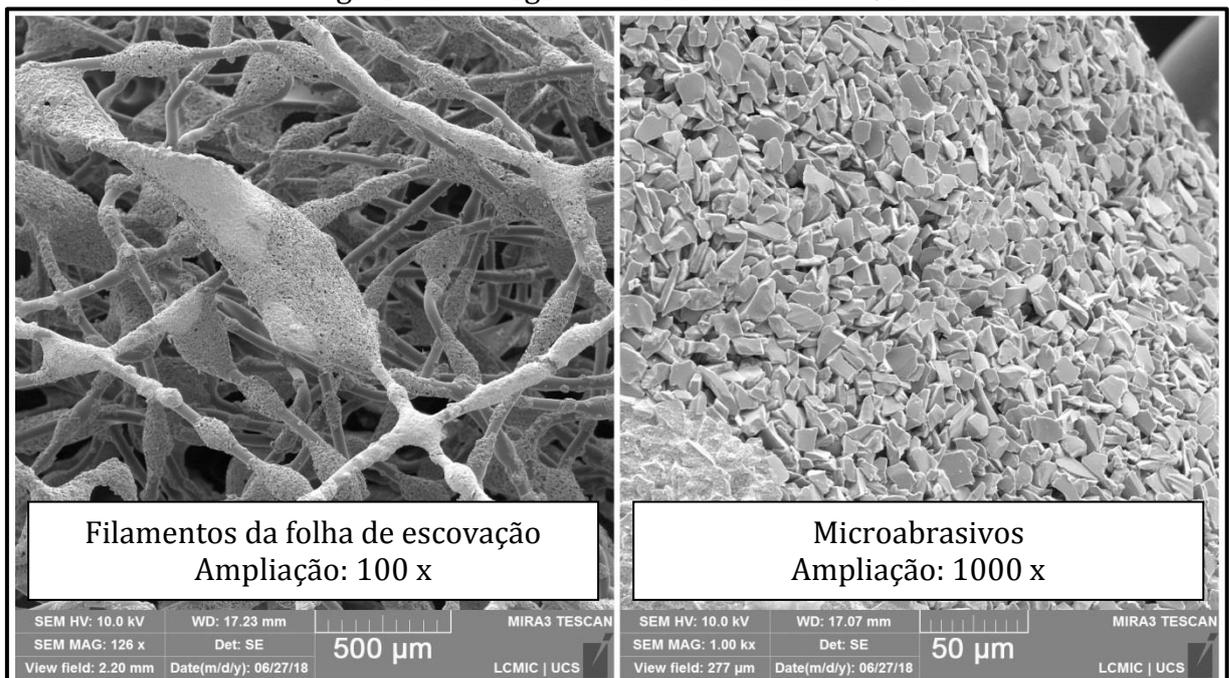


Fonte: o autor (2019)

Na imagem do MEV (Figura 17.b) é possível observar a irregularidade do gume apresentando defeitos e microlascamentos. O perfil (Figura 17.c) apresentou no final da superfície do flanco, na região que compõe o gume, um arredondamento possivelmente gerado devido alguma irregularidade ou falta de material na região que o apalpador do perfilômetro percorreu, como visto na imagem do MEV. De encontro a esse, tem o perfil que compõe a face, apresentando um comportamento linear contínuo, formando o gume característico pela forma de fabricação, retificação da superfície do flanco e face de forma distinta.

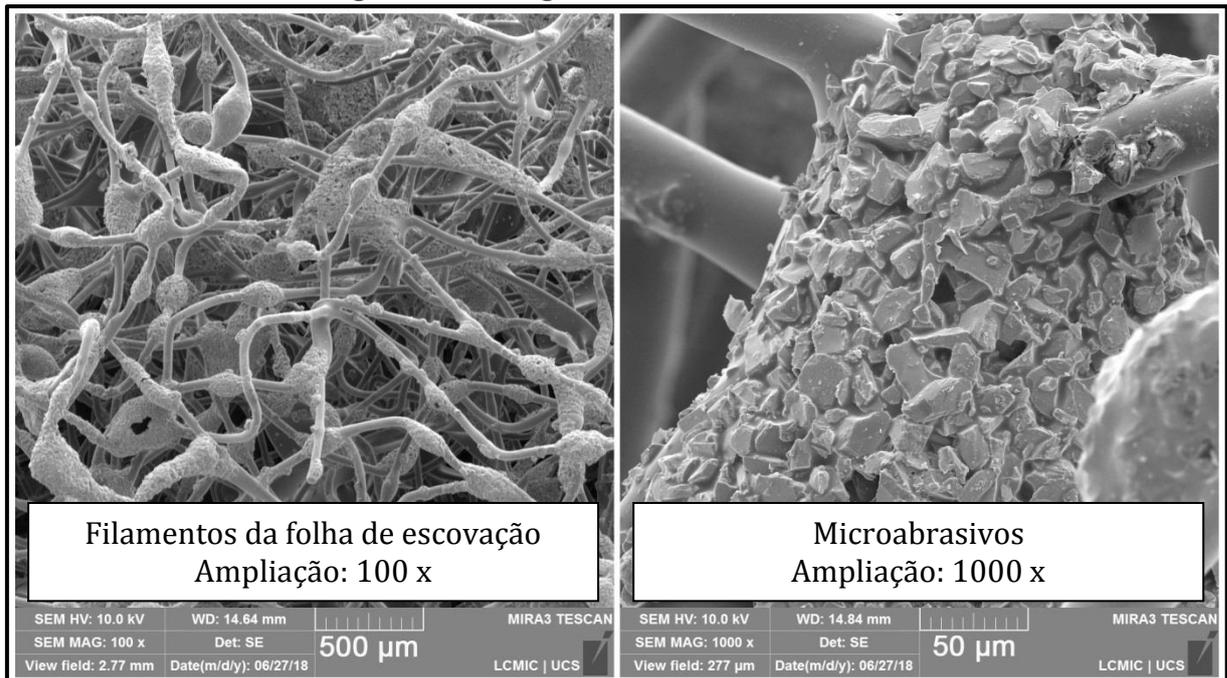
As folhas de acabamento superficial também foram analisadas através de imagens MEV e são apresentadas nas Figuras 18 e 19. Para ambas as folhas são possíveis observar, para a ampliação de 100 vezes, os filamentos de nylon que as formam. Também é notável, e de forma mais clara na ampliação de 1000 vezes, os microabrasivos distribuídos aleatoriamente sobre as superfícies dos filamentos, com grãos de formas irregulares e tamanhos variados. Quando comparados os microabrasivos de  $Al_3O_2$  com o SiC, uma diferença entre eles é perceptível quanto a tamanho e forma, as folhas com SiC possuem grão maiores com arestas menos afiadas, formados por maior número de faces dispostas de maneira irregular.

Figura 18 – Imagem MEV da folha com  $Al_3O_2$



Fonte: acervo de imagens GUS (2018)

Figura 19 – Imagem MEV da folha com SiC



Fonte: acervo de imagens GUS (2018)

Na sequência, ocorreu a execução da primeira fase do teste de escovação sobre o gume 1 da ferramenta P2. As demais fases ocorreram de forma sequenciada, de acordo com resultados que foram sendo obtidos, bem como foi realizado e citado por Denkena et al. (2010) e Bassett, Köhler e Denkena (2012) em testes de preparação por escovação.

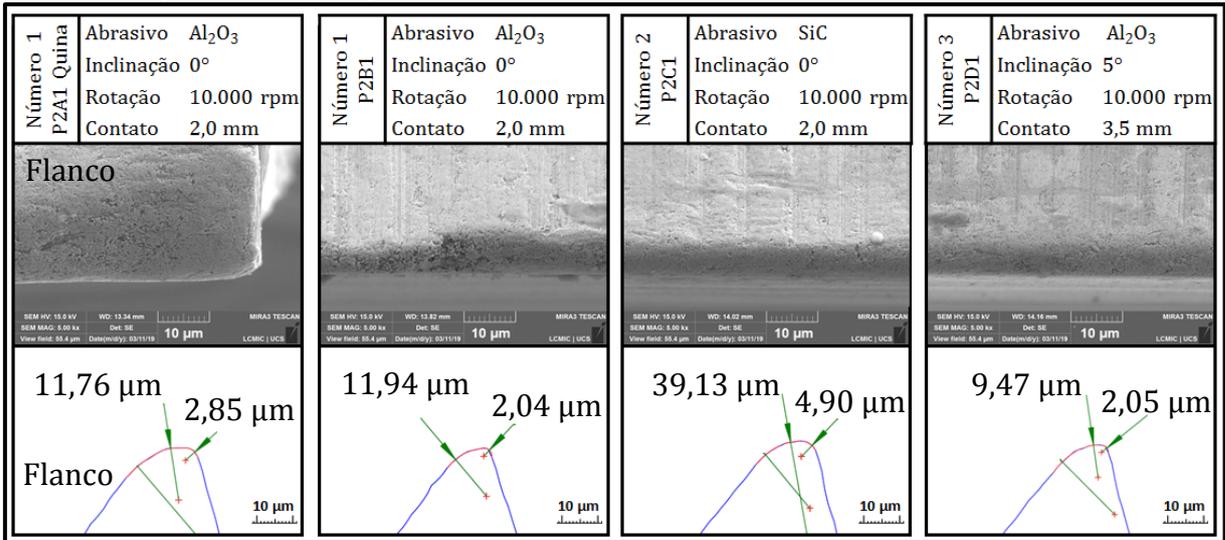
As fases do teste de escovação anteriormente citadas na Tabela 1, são apresentadas e os resultados obtidos são discutidos.

#### 4.1.1 Fase 1

As configurações de cada execução e resultados desta primeira fase são apresentadas na Figura 20. Também é registrada a ferramenta e região do gume no qual foi executada a configuração. As imagens MEV com os gumes preparados possuem ampliação de 5000 vezes e os perfis obtidos nos retornam a posição sobre a cunha e valores para os arredondamentos gerados pela escovação.

Inicialmente, a execução foi realizada com rotação de 10.000 rpm a fim de preservar a integridade dos filamentos de nylon (STANGO, 1999). Nas configurações 1 e 2 foi variado o disco abrasivo. Já na terceira foi proposta uma pequena inclinação e aumento de contato para verificar o comportamento do gume.

Figura 20 – Configurações e resultados do teste de escovação na fase 1



Fonte: o autor (2019)

De modo geral, observou-se através das imagens que ocorreu, de fato, remoção de metal-duro da cunha, retornando em uma superfície com convexidade e praticamente sem grandes defeitos e discontinuidades, ao contrário da ferramenta P1.

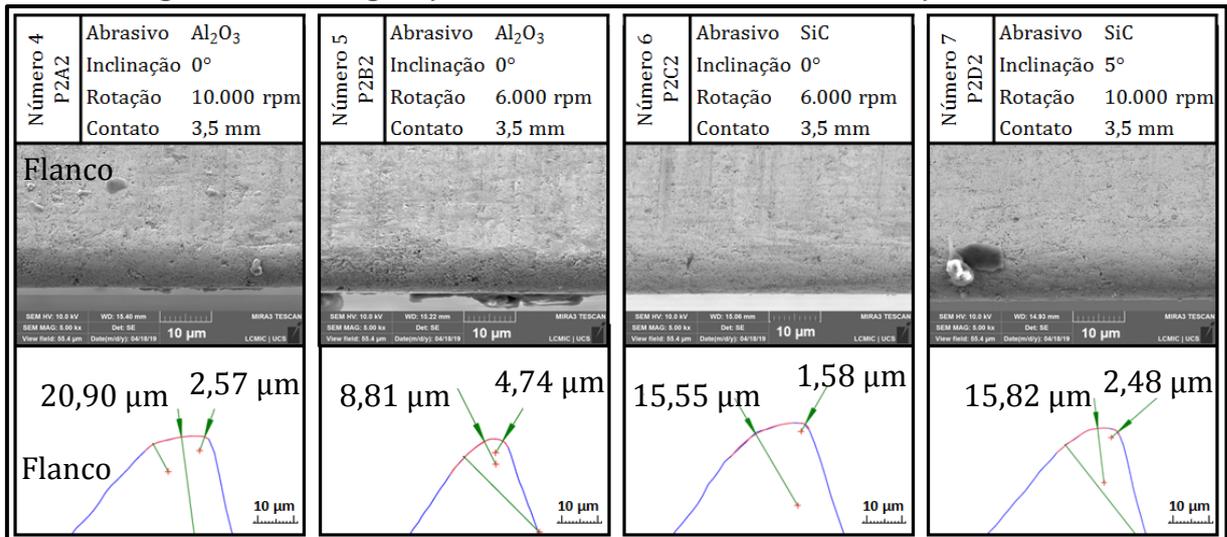
Pode ser observado que na escovação em P2B1, ocorre uma discontinuidade. Isso retorna que a remoção realizada não foi suficiente para corrigir esse defeito, porém, as análises anteriores à escovação mostraram que nas regiões A e B dos gumes, próximas a quina e por consequência, as mais afastadas da haste que é usada para fixação da ferramenta em sua fabricação, apresentam uma quantidade maior de defeitos e microlascamentos, conforme avaliação visual.

Os perfis dos gumes, de forma geral, apresentaram arredondamentos assimétricos deslocados para o lado do flanco da cunha, não atendendo o objetivo da preparação. A inclinação do disco em  $5^\circ$  na direção da face do gume na configuração nº 3 não apresentou melhora na simetria do arredondamento, quando comparado com a configuração 1, ambas feitas com abrasivo  $Al_3O_2$ .

#### 4.1.2 Fase 2

Na busca de confrontar os resultados iniciais, na fase 2 novas combinações foram propostas e aplicadas na ferramenta P2, sobre o gume 2, e são apresentadas junto aos resultados na Figura 21.

Figura 21 – Configurações e resultados do teste de escovação na fase 2



Fonte: o autor (2019)

Levando em consideração que a remoção de material pelo disco formado de filamentos impregnados de microabrasivos ocorre pelo mecanismo de abrasão, contrário a escovas de aço que removem o material devido ao impacto em altas rotações, a redução da rotação e aumento do contato foram admitidos a fim de proporcionar uma melhora do contato entre disco e gume.

Como pode ser observado no perfil da configuração nº 4 com  $Al_3O_2$ , mantendo a 10.000 rpm e passando a profundidade de contato para 3,5 mm, observou-se aumento da taxa de remoção do metal-duro, gerando praticamente um chanfro no gume.

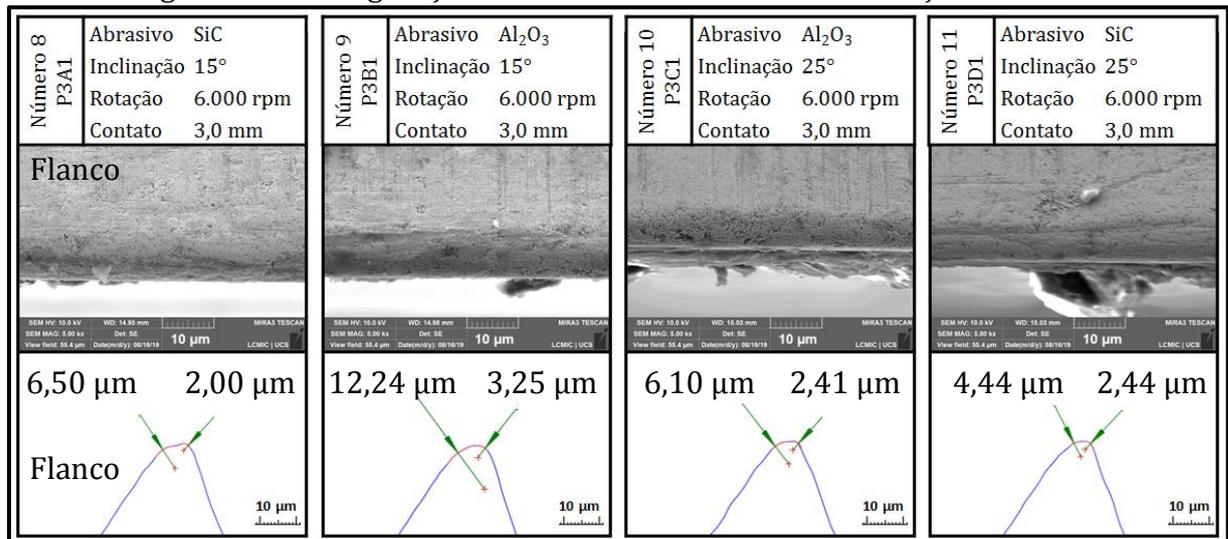
Com a redução da rotação, na configuração nº 5 com  $Al_3O_2$ , houve melhora na disposição do arredondamento, porém, a maior parte de seu perímetro está disposta na superfície do flanco. Comparando configurações na qual apenas ocorreu a variação do abrasivo, caso 3 e 4 na fase 1, e caso 6 e 5 na fase 2, um comportamento se repete, maiores arredondamentos foram obtidos quando utilizado carbeto de silício. Novamente a inclinação de  $5^\circ$  não gerou simetria, mas manteve a relação de maior arredondamento gerado com carbeto de silício, podendo ser observado quando comparada as configurações números 3 e 7.

Com a possibilidade de ajustes na profundidade de contato e inclinação, novas configurações foram propostas a partir das observações descritas até então.

### 4.1.3 Fase 3

Na fase 3, apresentada na Figura 22, a proposta foi reduzir a profundidade de contato para diminuir a deformação do disco quando este avança com sua face sobre o gume, evitando raios maiores sobre o flanco do que sobre a face. Foi admitida nova profundidade de contato e mantida a rotação de 6.000 rpm.

Figura 22 – Configurações e resultados do teste de escovação na fase 3



Fonte: o autor (2019)

Nessa fase foi utilizada a ferramenta P3, gume 1. Assim, duas novas inclinações foram testadas para verificar suas influências que, conforme Denkena et al. (2010), diferentes inclinações podem ser usadas na busca de arredondamentos assimétricos sobre a face desejada, e nesse caso, usada para corrigir a assimetria que ocorre sobre o flanco. Como na fase 1 a inclinação aplicada de 5° não resultou em grandes diferenças, optou-se por variar à partir desse valor mais 10°, sendo aplicado em teste 15 e 25°.

Os gumes gerados apresentaram uma qualidade superficial inferior ao obtidos nas fases 1 e 2 mas, os perfis trazem valores de arredondamentos menores para a seção do flanco, reduzindo o efeito de assimetria da fases anteriores.

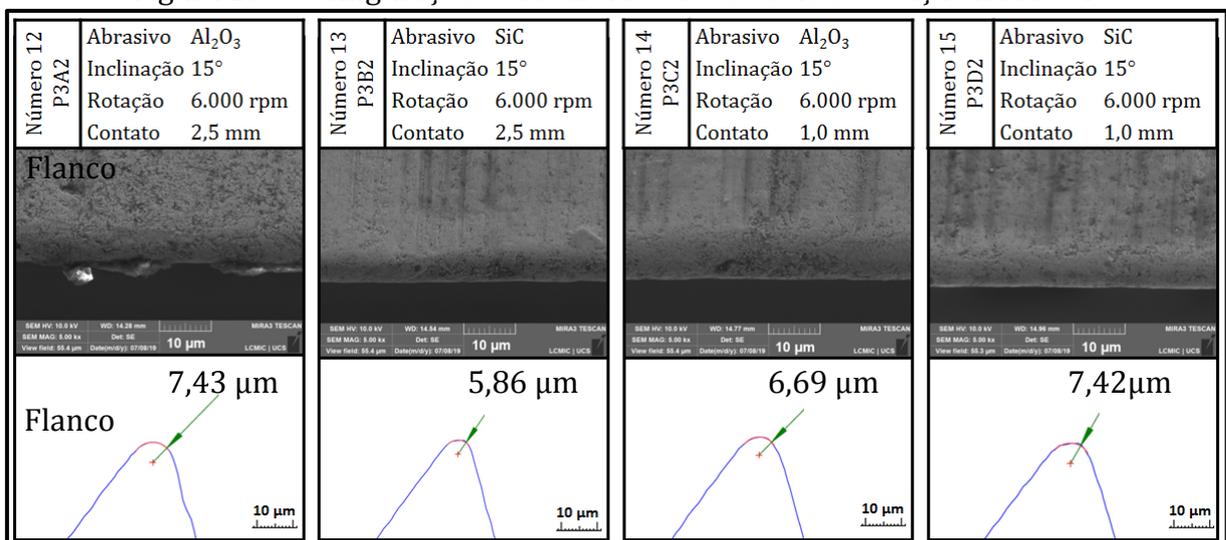
Com esses resultados observa-se que a inclinação de 25° não teve uma influência significativa quando comparada aos arredondamentos gerados a 15°. Levando em consideração o tempo de escovação, que é constante em todas as configurações, a inclinação de 25° poderia gerar melhores resultados em maior tempo de execução, mas para o caso realizado, essa inclinação pareceu exagerada e não gerou maiores

arredondamentos na superfície da face da cunha. Assim, a inclinação de 15° foi mantida e novas combinações foram propostas para uma nova fase do teste de escovação.

#### 4.1.4 Fase 4

Para a fase 4, última aplicada em ferramenta protótipo, foi realizado mais um teste com a variação da profundidade de contato e abrasivos, mantida a rotação de 6000 rpm e a inclinação de 15°. A Figura 23 mostra as combinações executadas na ferramenta P3, gume 2, e os resultados obtidos.

Figura 23 – Configurações e resultados do teste de escovação na fase 4



Fonte: o autor (2019)

Nessa fase optou-se pela profundidade de contato de 2,5 mm para reduzir a pressão imposta pelo disco e reduzir o arredondamento sobre o flanco obtidos na fase 3. Conforme Bassett, Köhler e Denkena (2012) o contato ente 1,25 e 1,50 mm representaria o limite para o uso radial de escovas de SiC, assim, também foi posto em teste o posicionamento de 1,0 mm.

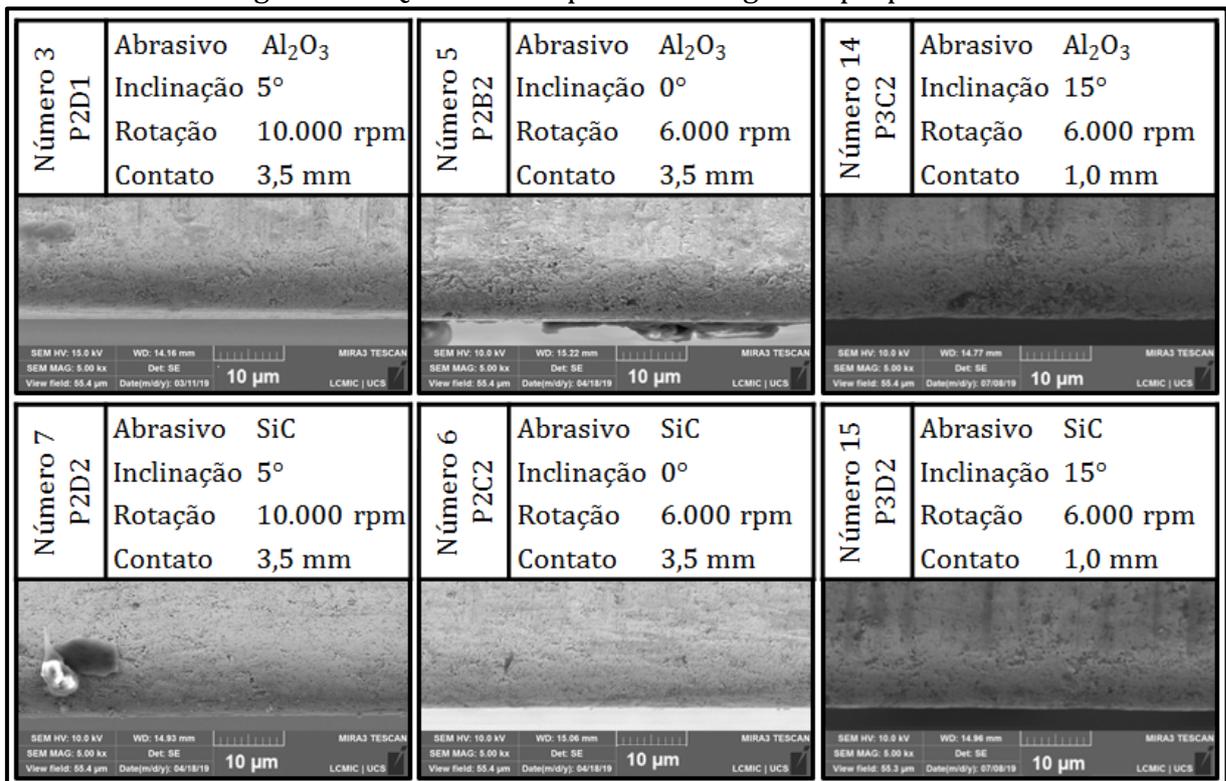
A preparação de número 12 retornou em um gume de aspecto mais rugoso. Considerando que o arredondamento é considerado pequeno e a região do gume é a A, que geralmente apresenta maiores defeitos, acredita-se que a remoção de material foi insuficiente para uma preparação adequada. Em contra partida, na configuração 13 executada com SiC, retornou em melhor resultado comparado a anterior citada.

As execuções com variação da profundidade de contato retornam em preparações similares mesmo com a variação dos abrasivos e os arredondamentos apresentam uma disposição próxima a de simetria sobre a cunha.

#### 4.1.5 Avaliação final do teste de escovação

Ao longo de todo o teste de escovação foi realizada a variação dos discos de folhas abrasivas, e essa variação, passa a ser um diferencial em todo o teste de escovação devido a um comportamento que pode ser observado nas preparações realizadas com o disco de filamentos com  $Al_2O_3$ . É possível observar que ocorreu com maior frequência a fratura do metal-duro na superfície escovada com o óxido de alumínio, podendo ser observado o desprendimento de grãos em algumas regiões, situação de menor incidência quando utilizado o carbetto de silício. Na Figura 24, são rerepresentadas preparações realizadas para algumas comparações serem feitas.

Figura 24 – Qualidade superficial dos gumes preparados



Fonte: o autor (2019)

Na parte superior da Figura 24, são mostrados três gumes gerados com o abrasivo  $Al_2O_3$ , e abaixo desses, gumes preparados com SiC. Realizando uma

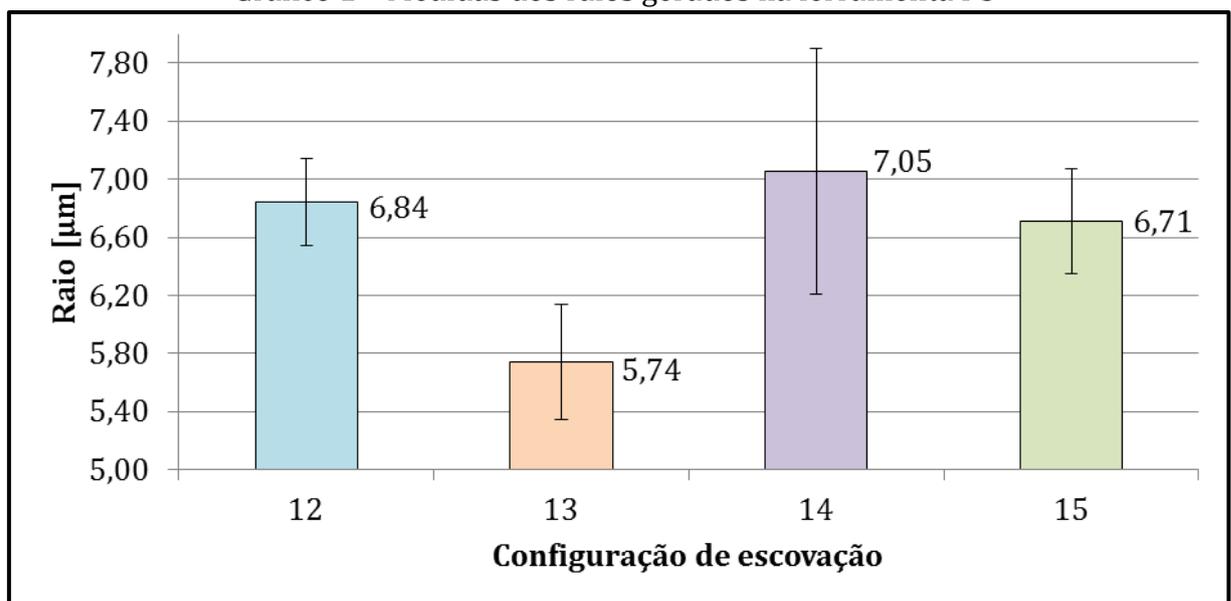
comparação variando os abrasivos, os gumes na parte superior da Figura 24 apresentam maior incidência de pontos escurecidos e pequenas falhas com falta de material devido ao desprendimento de grãos do metal-duro. Esse comportamento observado juntamente com informações do fabricante das folhas abrasivas, na qual indica o SiC para uso em materiais não-ferrosos, faz com que a preparação a ser executada nas fresas, composta primariamente por carbeto de tungstênio junto ao ligante cobalto, seja feita com SiC.

Outro ponto observado foi à qualidade superficial dos primeiros gumes preparados. Os de maiores arredondamentos no flanco apresentam uma textura mais homogênea devido a maior remoção de metal-duro. Mesmo esses arredondamentos apresentando boa qualidade superficial, sua localização sobre a cunha descarta a escolha das preparações realizadas nas fases 1, 2 e 3, que na avaliação dos perfis, retornaram em arredondamentos de gume que puderam ser caracterizados pela união de 2 arcos diferentes, sendo o maior sempre localizado sobre o lado do flanco.

Os perfis obtidos na fase 4 trazem uma melhor simetria que nas outras fases, alguns até apresentam um deslocamento do raio para a superfície da face, condição favorável para o fresamento, conforme visto na revisão bibliográfica.

Para definição final, restou a questão dimensional para os raios gerados. Na fase 4 foram realizadas três medições em cada região e através dos cálculos das médias, desvios padrões e incertezas, foi gerado o Gráfico 1 para auxiliar na avaliação e decisão.

Gráfico 1 – Medidas dos raios gerados na ferramenta P3



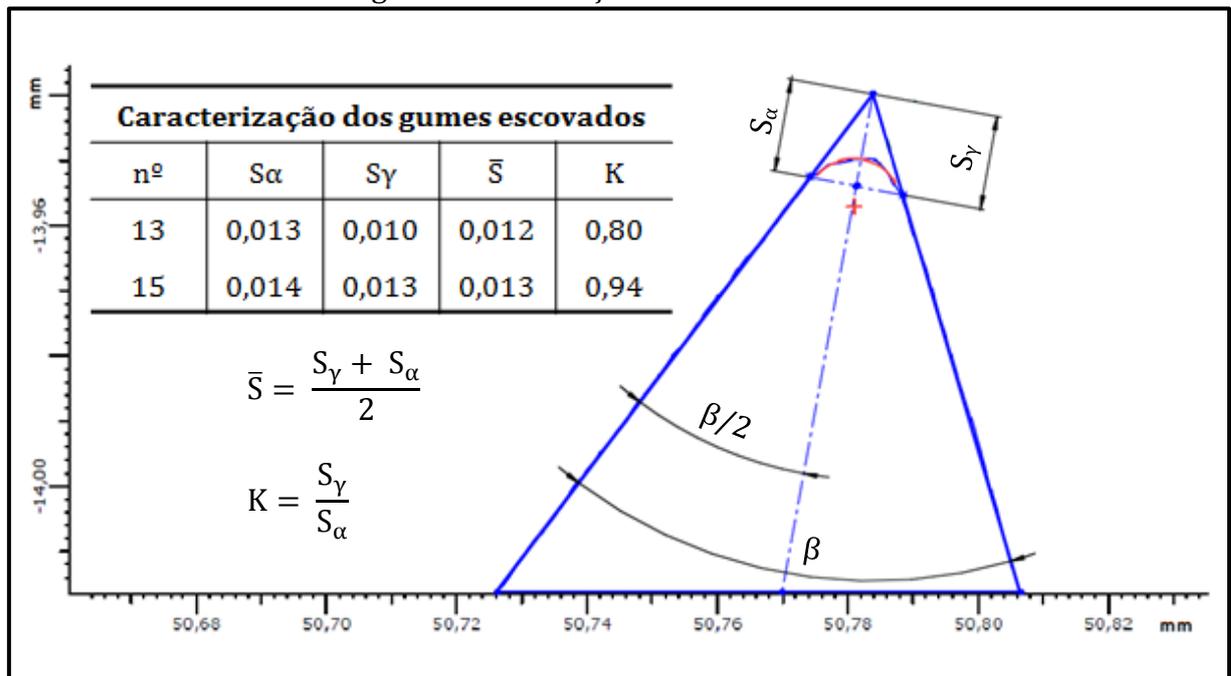
Fonte: o autor (2019)

Nas configurações 12, 14 e 15 os raios de gume resultantes podem ser considerados iguais levando em consideração as incertezas. Assim, essas três preparações retornam em um raio médio de 6,87  $\mu\text{m}$ .

Conforme Kennedy (2014), o raio do gume deve estar na faixa de um terço a metade do incremento de usinagem, nesse trabalho, deve-se considerar o avanço por gume de 0,05 mm. Essa consideração retorna em um raio de 0,0167 mm, ou então, 16,7  $\mu\text{m}$ . Segundo Otec (2017), para usinagem de aços com fresas de topo, raios de gume de 10 a 25  $\mu\text{m}$  são comumente utilizados melhorando a vida útil da ferramenta em até três vezes, dependendo da condição de aplicação.

Como anteriormente citado, as preparações com SiC foram as escolhidas para utilização, restando então as configurações 13 da região P3B2 e 15 da região P2D2. Assim, a verificação do fator de forma K foi realizada através das imagens de perfil e calculado através das Equações 1 e 2, sendo apresentados os valores médios mensurados na Figura 25.

Figura 25 – Avaliação do fator de forma



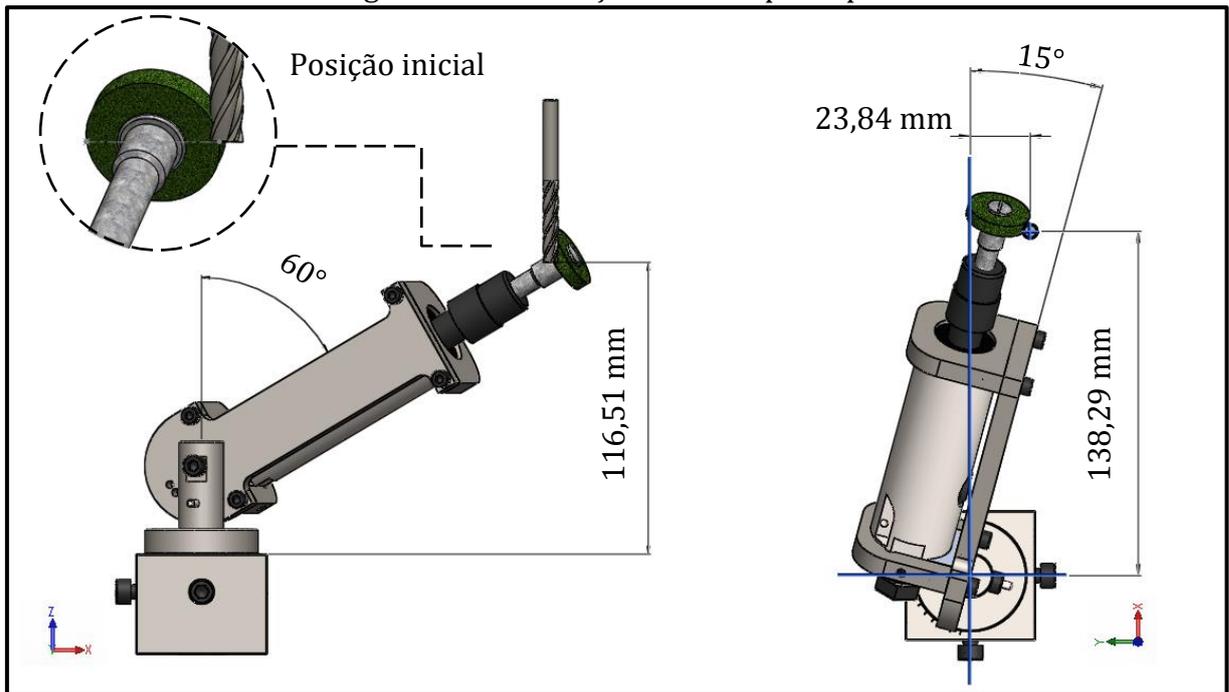
Fonte: o autor (2019)

A escolha entre as preparações com SiC se faz de acordo com o Gráfico 1, no qual a configuração número 15 apresenta o maior raio e o mais próximo dos valores referenciados pela literatura, com um valor médio de 6,71  $\mu\text{m}$  e incerteza de  $\pm 0,36 \mu\text{m}$ .

Essa configuração também resultou na melhor simetria, com fator de forma mais próximo a 1, sendo estimado o valor de 0,94 para três medições realizadas.

Através do modelamento do dispositivo de escovação previsto para essa fase, junto da fresa topo reto, representados na Figura 26, foi realizada a montagem e ajuste de posicionamentos para que a configuração 15 fosse replicada para o uso e execução da escovação na fresa principal.

Figura 26 – Escovação da fresa principal



Fonte: o autor (2019)

Admitindo a base do dispositivo como referência, coordenadas de posição foram extraídas para executar a montagem real junto ao centro de usinagem. A altura entre base e face da fresa posiciona a quina alinhada com o centro do disco, posição essa de início para a escovação.

Para reproduzir na fresa principal a configuração escolhida nos ensaios feitos com as fresas protótipo, algumas relações foram realizadas, devido ao desinteresse em preparar todo o gume principal da fresa topo reto para que ela pudesse ser reafiada e utilizada em outros ensaios. Assim, o deslocamento realizado na fresa topo reto foi à metade do feito anteriormente, agora 3,75 mm, e por consequência, para manter o tempo de execução, o número de repetição dobrou, passando para 32 vezes.

Na programação do centro de usinagem foi utilizado um comando de rosqueamento para fazer o disco percorrer o gume da fresa topo reto, que se apresenta de forma helicoidal, e realizar o arredondamento.

A escovação sobre o gume linear foi realizada com deslocamento da ferramenta protótipo a 120 mm/min. Para o comando de rosqueamento utilizado, esse valor entra na forma de rotação para rosca (S). Transcrevendo o valor de velocidade linear em velocidade angular para o raio da fresa de 3 mm, obtém-se o valor de 6,366 rpm. Nessa etapa, devido uma limitação para a execução desse parâmetro, foi feito um ajuste utilizando o valor de 7 rpm para a rotação de rosca. Junto a isso é informado um avanço linear, relativo ao passo da rosca (F), no nosso caso, o passo da hélice de 32,65 mm. Desta forma, a configuração 15 foi ajustada para realização da escovação das fresas originais a fim de executar o teste de usinagem.

#### 4.2 TESTE DE USINAGEM

Na execução do teste de usinagem foram utilizadas duas fresas de metal-duro, anteriormente apresentadas no capítulo 3.4. Essas fresas, com suas características originais de fábrica foram submetidas a teste de usinagem para avaliação da sua vida útil e qualidade superficial gerada. Após essa etapa, as mesmas foram encaminhadas ao fabricante para reafiação do topo, a fim de eliminar o desgaste apresentado e possibilitar a sua reutilização. No segundo momento as ferramentas foram escovadas, sofreram a preparação de gume determinada conforme as avaliações do teste de escovação e, novamente submetidas a teste de usinagem para comparar os resultados. Para diferenciação e acompanhamento dos resultados, as fresas receberam codificações, essas apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Codificações das fresas

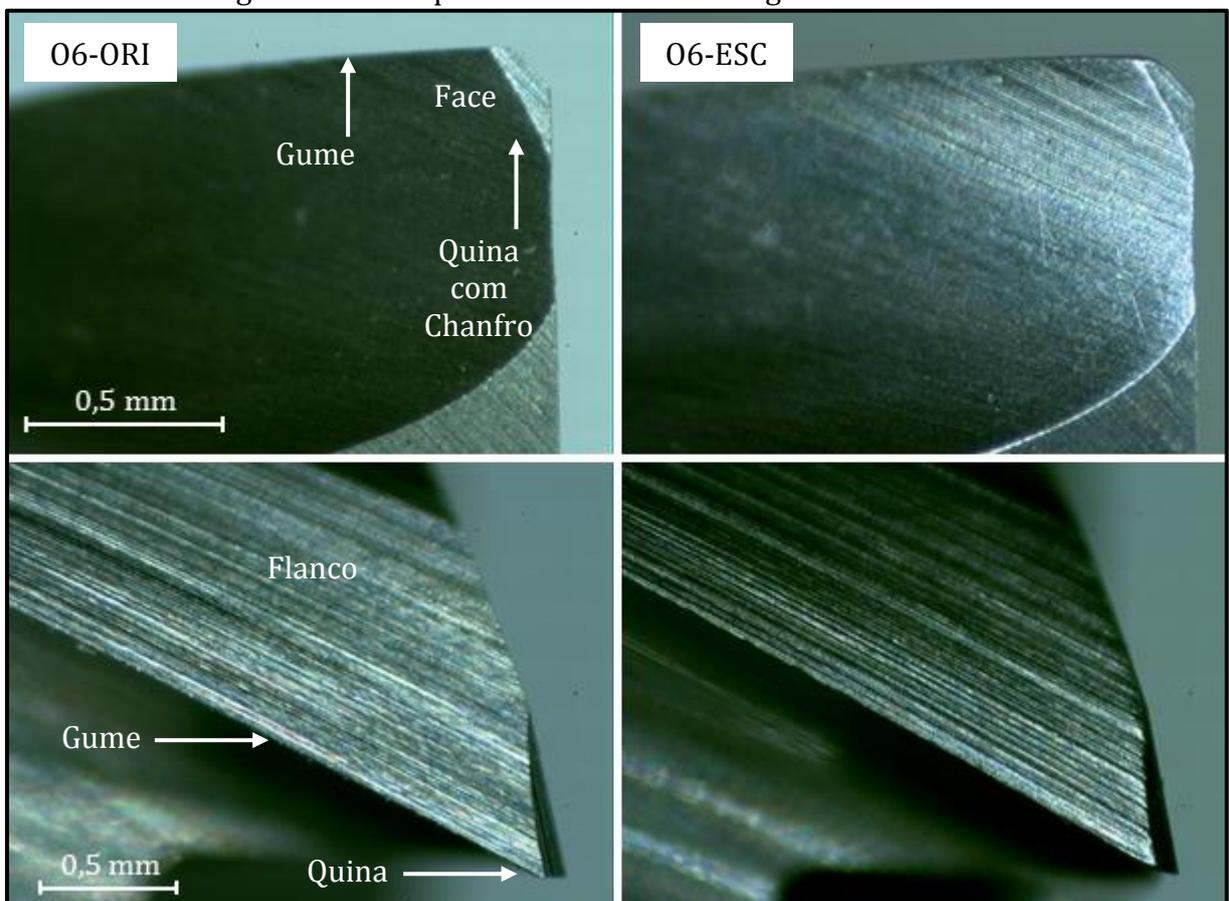
Fresas Originais	Pós-retificação Sem preparação	Fresa 1	06-1 ORI
		Fresa 2	06-2 ORI
Fresas Preparadas	Pós-retificação Pós-escovação	Fresa 1	06-1 ESC
		Fresa 2	06-2 ESC

Fonte: o autor (2019)

#### 4.2.1 Caracterização das fresas

A caracterização das fresas se faz necessária anterior ao teste de usinagem para detectar possíveis falhas nos gumes que possam influenciar de forma negativa os resultados. Essa verificação também proporciona elucidar detalhes particulares para as ferramentas bem como promover comparações. Na Figura 27, imagens do microscópio óptico mostram imagens representativas das fresas antes do teste de usinagem na condição original (ORI) e também após a preparação por escovação (ESC).

Figura 27 – Comparativo entre fresas originais e escovadas



Fonte: o autor (2019)

As fresas possuem um chanfro na região da quina, esse detalhe tem o objetivo de preservação, reforçando essa região da cunha, visto que no corte é a região que sofre maiores esforços mecânicos devido ser o ponto de união dos gumes primário e secundário.

As fresas originais apresentam arestas bem definidas que, após escovação, demonstraram uma suavização, como pode ser visto através da imagem da face em O6-ESC, na qual a região da quina apresenta o reflexo de luz emitido pelo microscópio. Esse reflexo é provocado pela superfície convexa, arredondada, obtida pela escovação, e se propaga ao longo do gume. Na imagem do flanco, observa-se também arredondamento da quina, no início do gume. Arredondamento sobre o flanco não é perceptível através das imagens, contrário à face, na qual nota-se alteração do gume.

#### 4.2.2 Vida útil das fresas

Para validar os resultados obtidos no teste de escovação, o teste de usinagem foi realizado para ser avaliada e comparada a vida útil das fresas, e também o comportamento de desgaste.

##### 4.2.2.1 Comportamento de desgaste

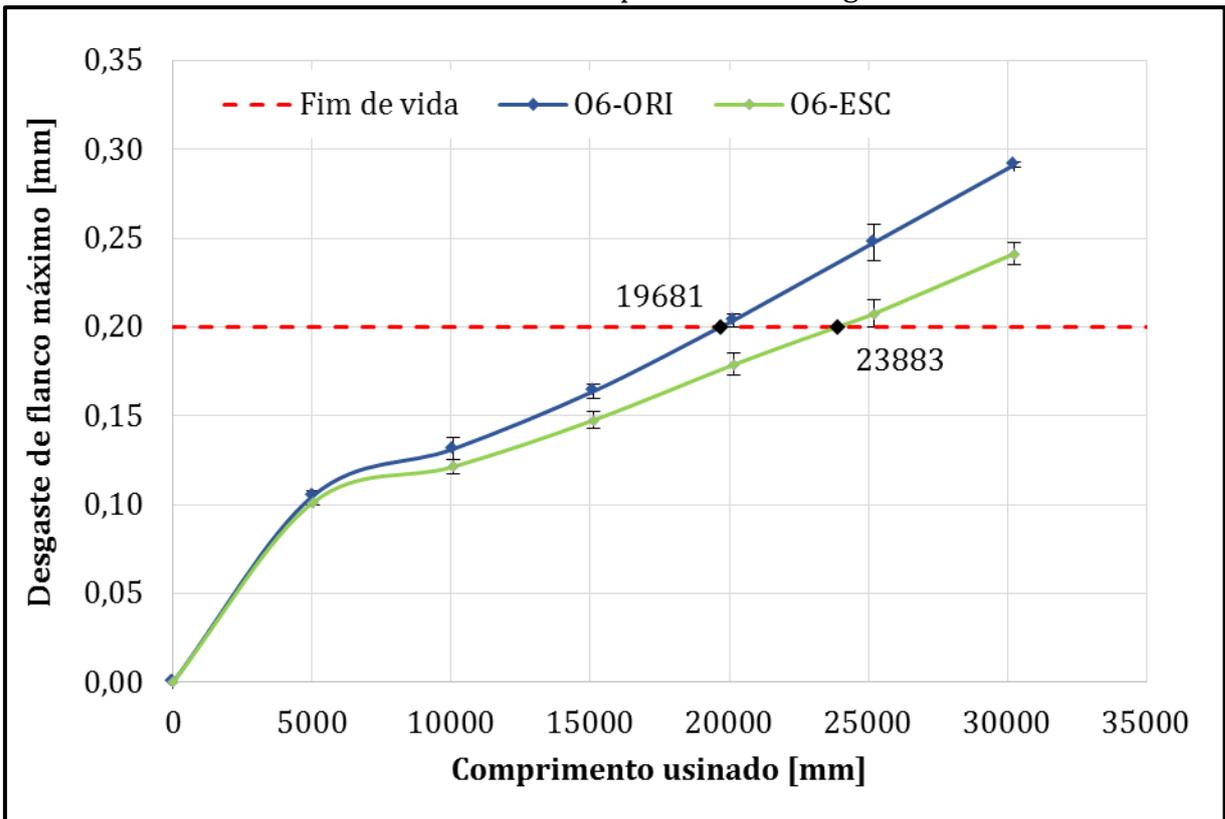
A avaliação do desgaste das fresas ocorreu a cada 5040 mm usinados. O desgaste avaliado e controlado foi o desgaste de flanco máximo ( $VB_{m\acute{a}x}$ ), marca que se propaga sobre a superfície do flanco, próximo a quina. Considerando que o desgaste medido refere-se a cada gume, para gerar as curvas de comportamento foi considerado um desgaste para a fresa, resultante das médias dos desgastes dos quatro gumes. Assim, os ensaios foram conduzidos até que as fresas ultrapassassem o  $VB_{m\acute{a}x}$  de 0,20 mm, e para cada condição, original e escovada, foi realizada a réplica para comparação dos resultados.

O Gráfico 2 apresenta as curvas de comportamento de desgastes. Em azul, a representação da média de desgastes ao longo do comprimento usinado para as duas fresas em condição original. Em verde, o mesmo ocorre, mas para as fresas que foram preparadas pela escovação proposta. Como pode ser observado, no início o desgaste foi gerado de forma acentuada para um pequeno comprimento usinado, vindo de acordo com o Estágio I de desgaste citado por Machado, Abrão e Coelho (2015).

Na primeira etapa de verificação, os desgastes ocorreram de forma similar. Na sequência da usinagem a diferença aumenta e as taxas de desgaste ocorrem de maneira diferente para as fresas ORI e ESC, ocasionando valores de comprimentos usinados

distintos quando atingido o fim de vida das fresas,  $VB_{\text{máx}} = 0,2 \text{ mm}$ , considerado conservador já que é sugerido para situações de acabamento, fazendo com que os desgastes não cheguem até o Estágio III (desgaste catastrófico). Para as fresas O6-ORI a média de comprimento usinado foi de 19681 milímetros, enquanto que para as O6-ESC, a média ocorreu em 23883 milímetros. Isso retorna um aumento de 21,35 % na vida útil das fresas escovadas.

Gráfico 2 – Curvas comparativas de desgaste



Fonte: o autor (2019)

A melhora da vida útil das fresas é associada ao processo de escovação, o qual se mostrou efetivo durante todo o teste de escovação, fazendo com que o gume apresentasse uma suavização, visto na caracterização da fresa, que pode contribuir para estabilidade mecânica, promovendo esse aumento da vida útil.

Segundo os experimentos publicados por Denkena e Biermann (2014), o desempenho de ferramentas escovadas aplicadas ao fresamento passou de 80 %. Nesse trabalho, mesmo obtendo uma melhora da vida útil menor do que a literatura nos traz, esse aumento de 21 % é significativo visto que em trabalhos correlatos como o de Ost (2016), aplicando em seu processo uma execução similar à apresentada aqui, não teve

melhora da vida útil da ferramenta utilizada. Outra referência que pode ser citada é Silva (2018), que aplicando diferentes folhas de acabamento superficial para preparação de fresas topo teve redução da vida útil da ferramenta utilizada, e o menor comprimento usinado foi com as folhas SSF, as mesmas escolhidas após a execução do teste de escovação para a preparação das fresas desse trabalho, retornando na melhora de vida útil apresentada no Gráfico 2.

A diferença de resultados alcançados se dá principalmente ao fato de onde o arredondamento ocorre sobre a cunha, nesse trabalho usou-se o arredondamento de melhor simetria. Conforme observado em Silva (2018), a forma de preparação executada promove um arredondamento tendendo ao flanco da cunha, e isso pode ser comprovado pelo relatório de medição de Ost (2016), visto que os modos de preparação são similares, retornando gumes com fator de forma  $K < 1$ .

#### 4.2.2.2 Avaliação de desgaste

Para a avaliação dos mecanismos, imagens foram realizadas a cada parada de medição do desgaste. De modo geral, o desgaste de flanco ocorre através do mecanismo de abrasão, no qual o atrito entre os flancos da fresa contra o material usinado promove a perda contínua de micro partículas, gerando a marca de desgaste, a mesma utilizada para medição e determinação do fim de vida.

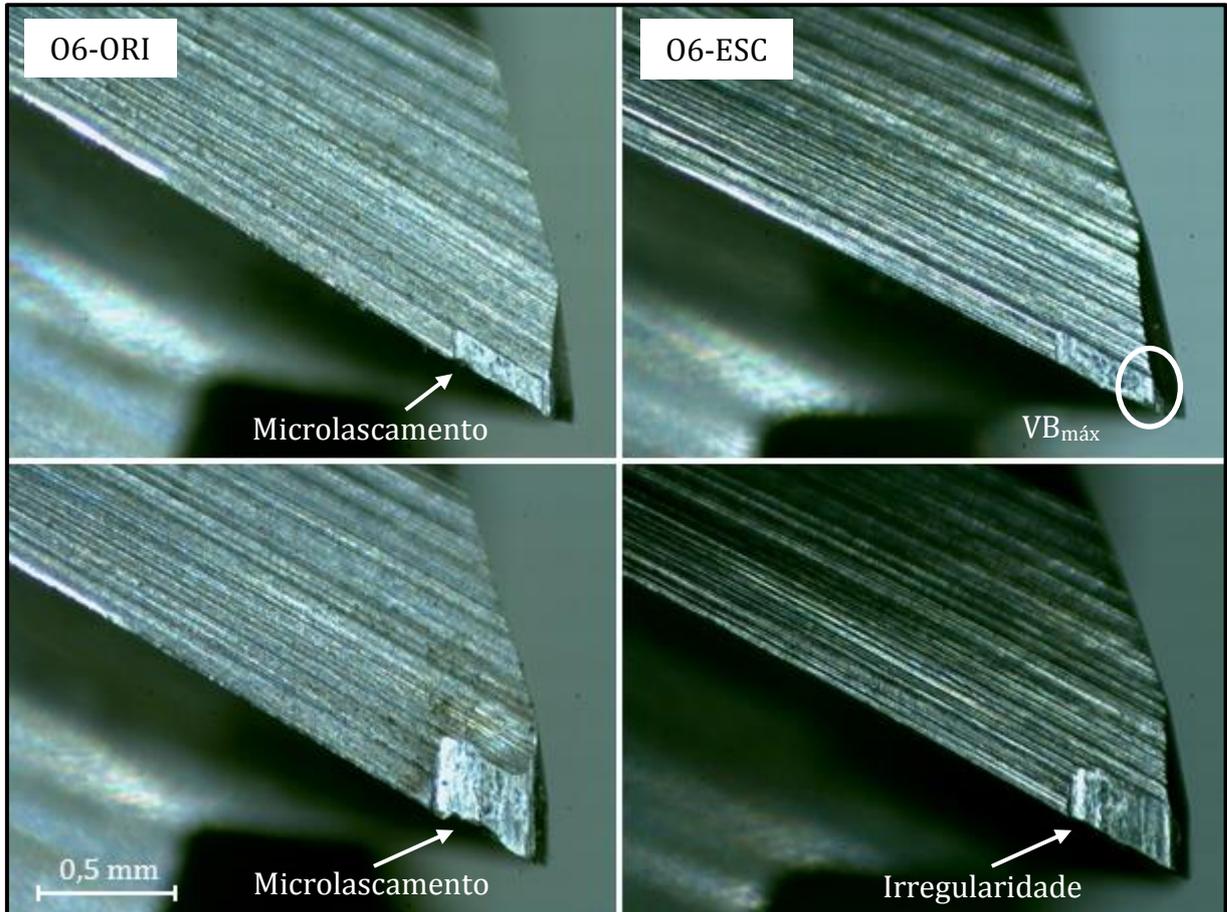
Ao longo do teste de usinagem, nas paradas para medições de desgastes foi possível notar a ocorrência de microlascamento do gume na região de trabalho. Esse fenômeno ocorreu para 2 gumes da fresa O6-1 ORI e para 3 gumes da fresa O6-2 ORI no final dos primeiros 5040 mm usinados. Nas paradas seguintes a ocorrência reduziu, mas, microlascamentos estiveram presentes até o final da usinagem para as fresas em estado original, em especial para o gume 2 da fresa O6-1 ORI apresentado na Figura 28.

Para as fresas escovadas, observou-se microlascamento apenas no gume 2 da fresa O6-2 ESC, após 5040 e 10080 mm usinados. Nas demais verificações os gumes apresentaram apenas irregularidade na região do desgaste. A Figura 28 apresenta um gume escovado (O6-ESC) na primeira parada e após o fim de vida. Nas imagens apresentadas pode ser observado um desgaste menor comparado ao original.

Segundo Stemmer (1995) esses microlascamentos são promovidos pelo mau acabamento do gume composto por um material muito frágil, que acabam promovendo

a perda de material do gume, acelerando o desgaste. Como esse fenômeno ocorreu de forma singela para as fresas escovadas, sua taxa de desgaste é inferior, e essa situação favorável pode ser associada à preparação realizada.

Figura 28 – Desgastes de flanco

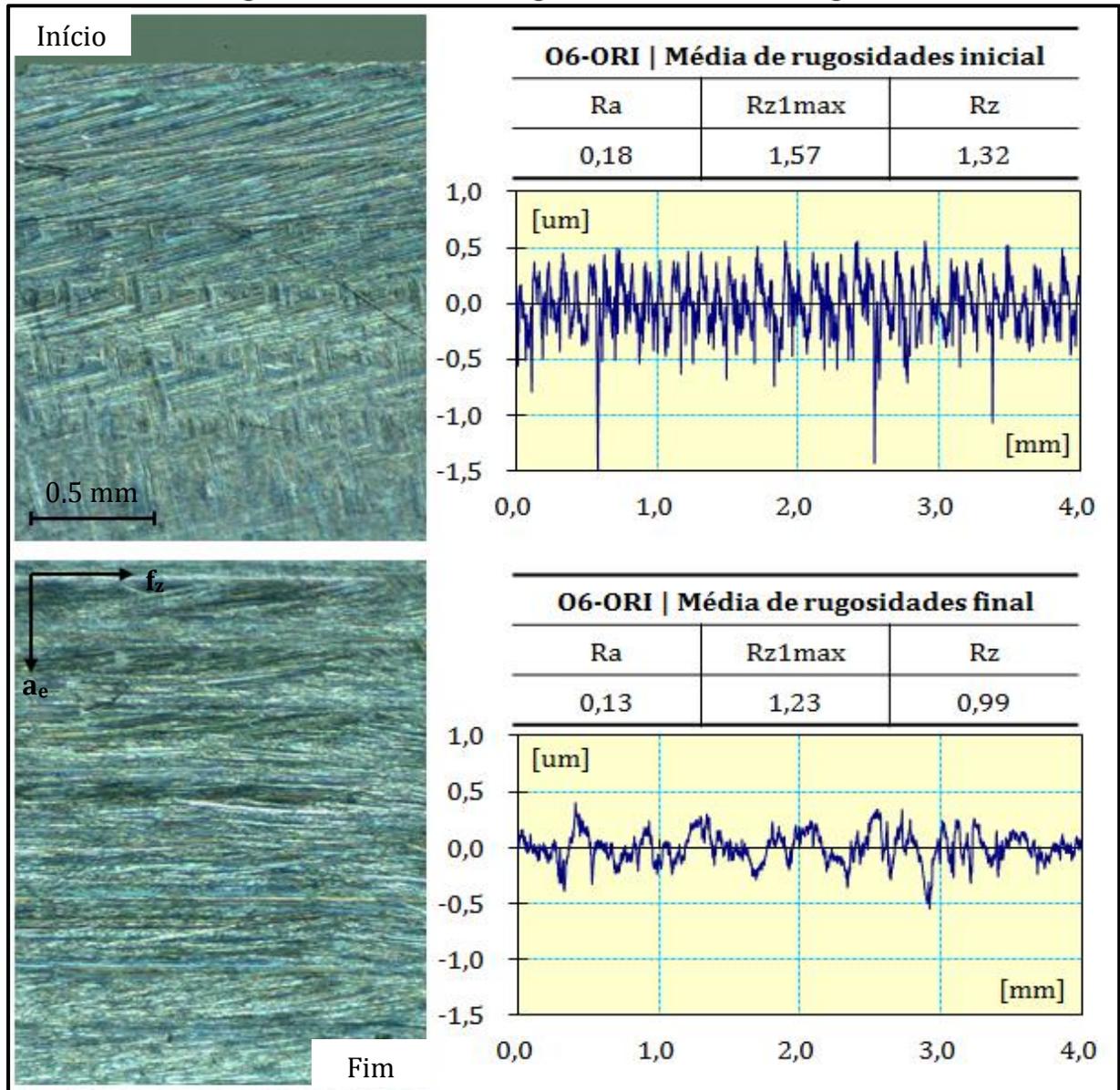


Fonte: o autor (2019)

#### 4.2.3 Qualidade superficial

A qualidade superficial do corpo de prova gerada durante o teste de usinagem foi avaliada através de imagens de textura e medições de rugosidades juntamente com seus perfis. Essa caracterização foi realizada a fim de comparação entre os resultados obtidos para cada grupo de fresas utilizado. Nas Figuras 29 e 30 são apresentados as texturas e perfis de rugosidades representativos para início e fim de vida das fresas originais e escovadas, além dos valores de rugosidades médios para o teste e réplica de cada condição de fresa usada.

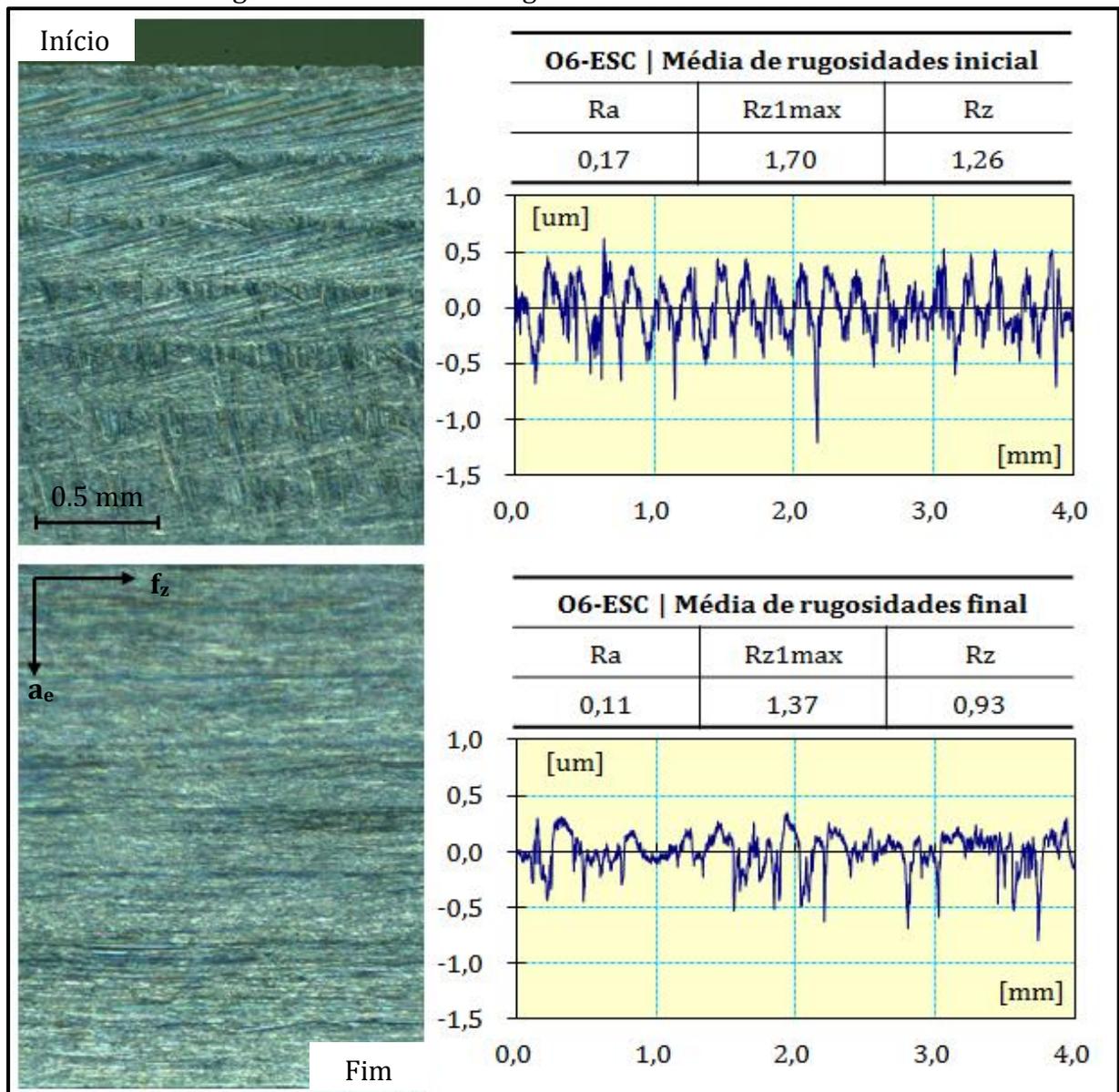
Figura 29 – Texturas e rugosidades das fresas originais



Fonte: o autor (2019)

Conforme o uso das fresas, o desgaste manifesta-se de forma crescente, e a alteração do gume na região de trabalho é constante. Desta forma, a superfície gerada não apresenta uma única textura do início ao fim da usinagem, como pode ser observado nas imagens de texturas nas Figuras 29 e 30. Ambas as fresas geraram texturas iniciais similares, na qual as primeiras passagens da ferramenta resultaram em marcas de corte definidas, apresentando um padrão. Nas demais passagens, a textura sofreu alteração e no fim de vida, não sendo mais possível observar marcas pronunciadas e definição de passagem.

Figura 30 – Texturas e rugosidades das fresas escovadas

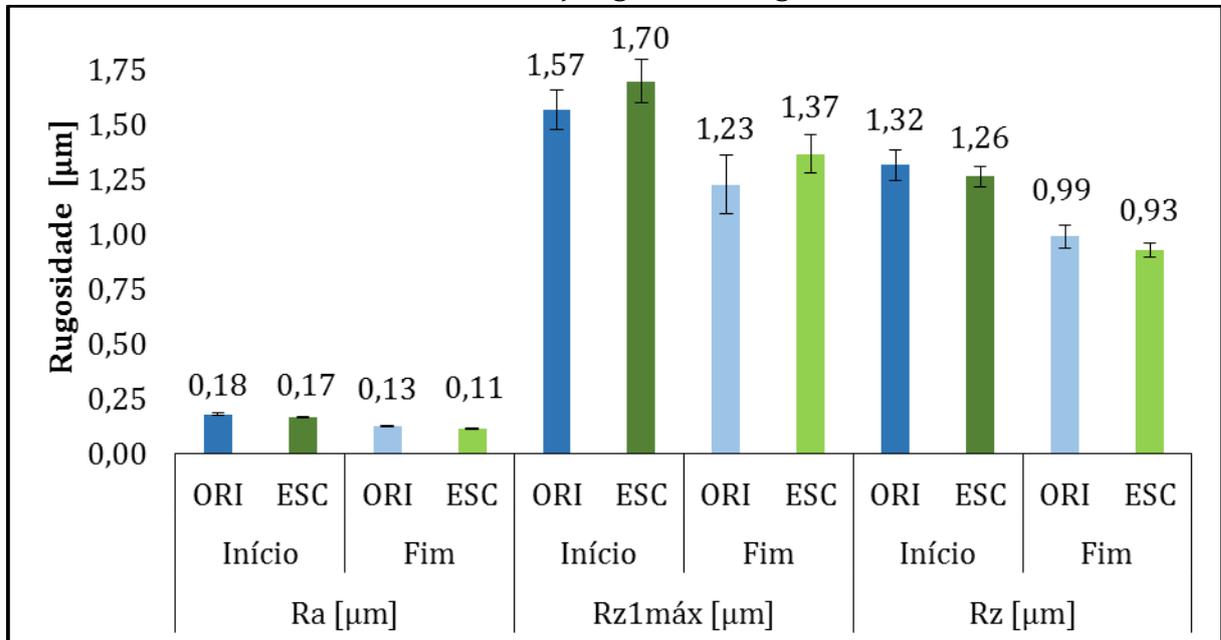


Fonte: o autor (2019)

Os perfis de rugosidades, para ambas as situações testadas, trazem no início um comportamento padrão, vindo de encontro com a situação anteriormente citada. Já no fim do teste de usinagem os perfis apresentam-se de forma distinta ao longo do trecho verificado, também vindo de encontro com a questão de que o corte já não é mais realizado com eficiência pela ferramenta que passa a exercer maiores deformações plásticas ao invés de cisalhamento para remoção do cavaco, recalcando material sobre a superfície que apresenta esses perfis heterogêneos e valores de rugosidades menores que na fase inicial, devido redução de vales e picos na superfície usinada. Os valores mensurados acabam sendo, de modo geral, ligeiramente menores para as fresas

escovadas, tanto para as regiões de início e fim de vida. O Gráfico 3 apresenta a avaliação geral das medidas de rugosidades.

Gráfico 3 – Avaliação geral das rugosidades



Fonte: o autor (2019)

Para as medidas de Ra, tem-se pequenas incertezas para as 5 medições realizadas em cada situação. As médias retornam valores de Ra menores tanto para início quanto para fim de vida da fresa escovada. Isso se explica pelo pequeno raio obtido nas quinas das fresas, que é responsável pela qualidade superficial gerada. O raio suaviza as marcas de passagem da ferramenta e como visto na Figura 26, esse raio inicia na lateral cilíndrica da fresas e acaba na face de topo, apresentando um comportamento assimétrico com fator de forma  $K < 1$ . De acordo com Denkena, Koehler e Rehe (2012), esse tipo de arredondamento promove maiores deformações plásticas para o material usinado, reduzindo rugosidades. Outro fator foi a menor incidência de microlascamentos dos gumes preparados em comparação com os originais, que repercutiu em menores desgastes, contribuindo também para menores valores de rugosidades.

## 5 CONCLUSÃO

A execução desse trabalho proporcionou o conhecimento envolvendo preparações de gume, em especial as executadas por escovação, foco desse trabalho. Pode-se elucidar os benefícios trazidos pela boa prática desse pós-processamento em ferramentas de corte, que promovem o aumento da qualidade dos produtos gerados e beneficiarão economicamente os usuários dessas ferramentas.

A investigação de configurações diferentes para a execução do escovamento em ferramentas de metal-duro mostraram que distintos resultados podem ser alcançados, as imagens MEV realizadas durante o teste de escovação foram de grande importância auxiliando nas análises e projeção de novas estratégias de aplicação. Na busca de arredondamento de gume qualitativamente bom quanto à questão superficial e de medidas próximas a um terço do incremento de usinagem, considerando o avanço por gume de 0,05 mm, através da configuração número 15 utilizando folhas de acabamento superficial com abrasivos de carbetto de silício (SSF) foi obtido raio em torno de 6,7  $\mu\text{m}$ .

Para a aplicação dessa configuração na escovação das fresas de topo reto foi necessário projetar um dispositivo para ser utilizado por uma miniretífica pneumática em um centro de usinagem. Programação da máquina foi realizada baseada em programas pré-estabelecidos para rosqueamento.

A análise em microscópio óptico mostrou a suavização das arestas, arredondamento dos gumes e quinas. O aumento de vida das fresas em 21% demonstrou que se obteve melhora na estabilidade do gume pelo fato da menor ocorrência de microlascamentos, desenvolvendo uma taxa de desgaste inferior quando comparado com as fresas originais.

As rugosidades médias geradas pelas fresas escovadas foram ligeiramente menores que para as originais, esse comportamento está totalmente ligado à quina da fresa, a responsável por gerar a superfície usinada, que apresentou um arredondamento tendendo para o gume secundário. Isso provocou maiores deformações plásticas para o cavaco e suavização das marcas de passagem dos gumes sobre a superfície.

De modo geral, a preparação de gume por escovação é executada de forma simples e tem potencial para tornar as ferramentas de corte mais produtivas. À partir das investigações feitas, novas configurações podem ser realizadas e obtidos resultados ainda melhores, dependente das condições e material de usinagem.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nos resultados obtidos, são sugeridos os seguintes tópicos que podem ser complementares a esse trabalho:

- a) avaliar desgaste da fresa preparada pela configuração número 14, que utiliza dos mesmos parâmetros da configuração número 15, porém, utilizando o abrasivo  $Al_3O_2$ ;
- b) avaliar o desgaste com fresas preparadas com as demais configurações de escovação executadas na fase 4;
- c) avaliar a situação dos discos de filamentos abrasivos após serem utilizados na escovação do metal-duro;
- d) realizar testes com escovas de filamentos dispostos radialmente.

## BIBLIOGRAFIAS

- 3M (Brasil). **Folhas de Acabamento Scotch-Brite™ Multi-Flex**. 2019. Disponível em: [https://www.3m.com.br/3M/pt\\_BR/3m-do-brasil/todos-os-produtos-3m-do-brasil/~/Folhas-de-Acabamento-Scotch-Brite-Multi-Flex/?N=5002385+8709320+3293186372&preselect=8710644+3293786499&rt=rud](https://www.3m.com.br/3M/pt_BR/3m-do-brasil/todos-os-produtos-3m-do-brasil/~/Folhas-de-Acabamento-Scotch-Brite-Multi-Flex/?N=5002385+8709320+3293186372&preselect=8710644+3293786499&rt=rud). Acesso em: 31 maio 2019
- BASSETT, E.; KÖHLER, J.; DENKENA, B.. On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI 1045 with coated WC-Co inserts. **Cirp Journal Of Manufacturing Science And Technology**, [s.l.], v. 5, n. 2, p.108-126, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.03.004>.
- BERGMANN, B. et al. Chip Formation of Rounded Cutting Edges. **International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing**, [s.l.], v. 20, n. 1, p.37-44, jan. 2019. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-019-00020-4>.
- 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.
- BIERMANN, Dirk; BASCHIN, Alexander. Influence of cutting edge geometry and cutting edge radius on the stability of micromilling processes. **Production Engineering**, [s.l.], v. 3, n. 4-5, p.375-380, 13 nov. 2009. Springer Science and Business Media LLC.
- DENKENA, B.; BIERMANN, D.. Cutting edge geometries. **Cirp Annals**, [s.l.], v. 63, n. 2, p.631-653, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>.
- DENKENA, Berend et al. Cutting Edge Preparation by Means of Abrasive Brushing. **Key Engineering Materials**, [s.l.], v. 438, p.1-7, maio 2010. Trans Tech Publications. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.438.1>.
- DENKENA, Berend; KOEHLER, Jens; REHE, Michael. Influence of the Honed Cutting Edge on Tool Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 1, p.190-195, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.033>.
- DENKENA, Berend; LEON, Luis de; KÖHLER, Jens. Cutting Edge Preparation for Cemented Carbide Milling Tools. **Advanced Materials Research**, [s.l.], v. 76-78, p.597-602, jun. 2009. Trans Tech Publications. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.76-78.597>.
- DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2013. 270 p.

FRACARO, Janaina. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. 1. ed. Curitiba, PR: Editora Intersaberes, 2017. *E-book*. ISBN 978-85-5972-489-9. Disponível em:

<https://bv4.digitalpages.com.br/?term=Usinagem&searchpage=1&filtro=todos&from=busca&page=-2&section=0#/legacy/128237>. Acesso em: 27 abr. 2019.

FULEMOVÁ, Jaroslava; ŘEHOŘ, Jan. Influence of form Factor of the Cutting Edge on Tool Life during Finishing Milling. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 100, p.682-688, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.420>.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentos da moderna manufatura** : versão SI, volume 2 / Mikell P. Groover ; tradução Givanildo Alves dos Santos, Luiz Claudio de Queiroz. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

IEDI, Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (São Paulo) (Org.). **Carta IEDI - Edição 793: As Tendências Recentes nas Políticas de Ciência, Tecnologia e Inovação**. 2017. Disponível em: [https://iedi.org.br/cartas/carta\\_iedi\\_n\\_793.html](https://iedi.org.br/cartas/carta_iedi_n_793.html). Acesso em: 24 mar. 2019.

KENNEDY, B.. A better edge: Cutting tool engineering. **Conicity Technologies**, Estados Unidos, jan. 2014. Disponível em: <https://conicity.wordpress.com/2014/01/19/a-better-edge-cutting-tool-engineering/>. Acesso em: 24 out. 2019.

KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren 1: Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide**. 9. ed. Alemanha: Springer Vieweg, 2018. *E-book*. ISBN 978-3-662-54207-1. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54207-1>.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira. **Teoria da usinagem do materiais**. 3. ed. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda, 2015. *E-book*. ISBN 978-85-212-0846-4. Disponível em: <https://bv4.digitalpages.com.br/?term=Usinagem&searchpage=1&filtro=todos&from=busca&page=1&section=0#/legacy/171653>. Acesso em: 05 maio 2019.

MAISS, O.; GROVE, T.; DENKENA, B.. Influence of asymmetric cutting edge roundings on surface topography. **Production Engineering**, [s.l.], v. 11, n. 4-5, p.383-388, 5 jul. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-017-0742-7>.

MATHAI, George; MELKOTE, Shreyes. Effect of process parameters on the rate of abrasive assisted brush deburring of microgrooves. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 57, p.46-54, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.02.007>.

MELLO, João. Crise afetou investimentos em ciência, tecnologia e inovação, aponta relatório. **GNN, O Jornal de Todos os Brasis**, Brasil, 26 jun. 2017. Inovação. Disponível em: <<https://jornalggn.com.br/inovacao/crise-afetou-investimentos-em-ciencia-tecnologia-e-inovacao-aponta-relatorio/>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

OLIVEIRA, Fernando Brandão de et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 89, p.39-54, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001>.

OSG SULAMERICANA. **Catálogo de produtos**. Brasil, 2019. Disponível em: [https://osg.com.br/docs/catalogos/catalogo\\_geral\\_osg/web/html5](https://osg.com.br/docs/catalogos/catalogo_geral_osg/web/html5). Acesso em: 01 maio 2019.

OST, Charles Antônio. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificarrefrigerantes**. 107 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica), Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

OTEC. **Edge Rounding and Polishing of Cutting Tools**. Mai. 2017. Disponível em : [https://edeltec.com/wp-content/uploads/2017/05/EN-The-Importance-of-Cutting-Edge-Preparation\\_2016.pdf](https://edeltec.com/wp-content/uploads/2017/05/EN-The-Importance-of-Cutting-Edge-Preparation_2016.pdf) . Acesso em: 24 out. 2019.

OVERHOLSER, R. W; STANGO, R. J; FOURNELLE, R. A. Morphology of metal surface generated by nylon/abrasive filament brush. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 43, n. 2, p.193-202, jan.2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(02\)00112-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(02)00112-8).

REBEYKA, Claudemir José. **Princípios do processo de fabricação por usinagem**. 1. ed. Curitiba, PR: Editora Intersaberes, 2016. *E-book*. ISBN 978-85-5972-39-6. Disponível em: <https://bv4.digitalpages.com.br/?term=usinagem&searchpage=1&filtro=todos&from=busca&page=-2&section=0#/legacy/42171>. Acesso em: 27 abr. 2019.

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. 205 p., 2009.

SANDVIK COROMANT. **Treinamento Catálogo: Tecnologia em usinagem**. Suécia. AB Sandvik Coromant, 2017. PDF.

SERRATOOLS. **Cabeçotes para fresamento**. 2019. Disponível em: <https://www.serratools.com.br/produtos/cabecote-para-fresamento/>. Acesso em: 8 maio 2019.

SILVA, Alana Betina Dieter da. **Avaliação do desgaste e qualidade superficial obtidos com fresas de metal duro por diferentes polimentos**. 2018. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.

SIT - SOCIETÀ ITALIANA TECNOSPAZZOLE (Itália). **Brushes in Abrasive Nylon**. 2019. Disponível em: <https://www.sitbrush.com/Industrial-Technical-Brushes/Abrasive-Nylon-Brushes.php>. Acesso em: 12 mai. 2019.

SON, Seong Min; LIM, Han Seok; AHN, Jung Hwan. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 45, n. 4-5, p.529-535, abr. 2005. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.09.001>.

STANGO, Robert J.. Filamentary brushing tools for surface finishing applications. **Metal Finishing**, [s.l.], v. 97, n. 1, p.83-92, jan.1999. Elsevier BV.  
[http://dx.doi.org/10.1016/s0026-0576\(99\)80006-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0026-0576(99)80006-3).

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I.4.** ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos.** 3. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2005.

UCS (Caxias do Sul). Pesquisar: Eles pesquisam soluções para o setor metalmecânico. **Pioneiro**. Caxias do Sul, out. 2016. A Pesquisa na UCS, p. 1-32. Disponível em: <https://www.ucs.br/site/pesquisa-inovacao-e-desenvolvimento-tecnologico/caderno-especial-a-pesquisa-na-ucs/>. Acesso em: 24 mar. 2019.

USINAGEM BRASIL (Org.). **Setor de moldes prevê crescimento em 2019.** 2018. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/?cod=noticia/setor-de-moldes-preve-crescimento-em-2019/>. Acesso em: 24 mar. 2019.

VOPAT, Tomas et al. Cutting Edge Microgeometry and Preparation Methods. **Daaam Proceedings**, [s.l.], p.0384-0391, 2017. DAAAM International Vienna.  
<http://dx.doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.054>.

WANG, Hao; YU, Aibing; DONG, Liang; WU, Lei. Edge preparation of carbide tools with abrasive brushing method. **2011 Second International Conference On Mechanic Automation And Control Engineering**, [s.l.], p.256-259, jul. 2011. IEEE.  
<http://dx.doi.org/10.1109/mace.2011.5986907>.