

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

ADRIAN CASTILHOS LOPES

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE POLIMENTO COM MÍDIAS ABRASIVAS EM
FRESAS DE METAL DURO NA USINAGEM DO AÇO AISI P20**

CAXIAS DO SUL

2020

ADRIAN CASTILHOS LOPES

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE POLIMENTO COM MÍDIAS ABRASIVAS EM
FRESAS DE METAL DURO NA USINAGEM DO AÇO AISI P20**

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

2020

ADRIAN CASTILHOS LOPES

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE POLIMENTO COM MÍDIAS ABRASIVAS EM
FRESAS DE METAL DURO NA USINAGEM DO AÇO AISI P20**

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: 11 de dezembro de 2020

Banca Examinadora

Prof. Orientador Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Leandro Luís Corso

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Em usinagem, a condição dos gumes das ferramentas tem elevada influência nos resultados obtidos do processo, sabendo que depois da fabricação da cunha o gume pode apresentar defeitos. Em função disto, este trabalho estudou o efeito do tratamento de gume gerado pelo processo de escovamento com esponjas abrasivas em fresas de metal duro de topo reto, pois este tratamento é uma alternativa que pode preparar o gume, reduzindo ou eliminando defeitos, reforçando o mesmo e aumentando a vida útil da ferramenta. Os escovamentos dos gumes das fresas foram realizados através do processo de escovamento utilizado pelo grupo de usinagem (GUS) da Universidade de Caxias do Sul (UCS), que ocorreu com discos de esponjas abrasivas rígidas. Para avaliar os resultados dos escovamentos, os gumes das fresas foram analisados qualitativamente através de imagens obtidas por microscopia ótica e quantitativamente por medições de rugosidade realizadas na região do flanco, próximas ao gume principal. Após a análise dos gumes, duas das três fresas escovadas foram testadas em usinagem no aço AISI P20. Durante os testes, foram realizadas pausas para verificar os tipos de desgastes que ocorriam e os mecanismos de desgaste causadores dos mesmos, além de medir o desgaste de flanco VB_{max} de cada gume. Este procedimento aconteceu até que o desgaste atingisse o fim de vida pré-determinado de $VB_{max} = 0,2$ mm. A qualidade das superfícies geradas pelas fresas também foram avaliadas, para estas análises foram realizadas imagens de textura das superfícies e medições de rugosidades. As variáveis avaliadas das fresas polidas por esponjas rígidas, tanto do polimento aplicado quanto dos testes de usinagem realizados, também foram avaliadas em fresas polidas por esponjas flexíveis e em fresas sem tratamento, tendo como objetivo comparar as 3 diferentes condições de gumes. Contudo, as fresas escovadas com esponja rígida apresentaram uma vida útil 21,63 % menor que as fresas sem tratamento, enquanto que as fresas escovadas com esponjas flexíveis retornaram uma vida útil 6,92 % menor. No entanto as fresas escovadas com esponja rígida obtiveram a menor ocorrência de microlascamentos, já as fresas sem tratamento apresentaram a maior ocorrência. Os menores valores de rugosidades medidos foram os das superfícies geradas pelas ferramentas escovadas com esponja flexível e não houve diferenças significativas entre os valores medidos nas superfícies geradas pelas ferramentas escovadas com esponjas rígidas e pelas ferramentas sem tratamento. As texturas das superfícies geradas pelas ferramentas escovadas com esponja rígida, para início de vida, não apresentaram de forma evidente as marcas dos sulcos gerados pela passagem da ferramenta, já as outras condições não apresentaram diferenças significativas entre si. No entanto, é importante salientar que os resultados obtidos neste trabalho, para os testes de usinagem, apenas são válidos para as condições de corte aqui utilizadas, já que qualquer mudança nessas condições, possivelmente, retornaria resultados diferentes.

Palavras-Chave: Tratamento de Gume. Escovamento de Ferramentas. Fresamento de Topo Reto. Fresamento do Aço AISI P20. Vida Útil de Fresas.

ABSTRACT

In machining, the condition of the tool cutting edges has a high influence on the results obtained from the process, knowing that after manufacturing the wedge the cutting edge may present defects. As a result, this work studied the effect of cutting edge treatment performed by the brushing process with abrasive sponges in straight top carbide milling cutters, because this treatment is an alternative that can prepare the edge, reducing or eliminating defects, strengthening it and increasing the tool life. The treatments of the milling cutters were performed through the brushing process used by the machining group (GUS) of the University of Caxias do Sul (UCS), which occurred with rigid abrasive sponge discs. To evaluate the brushing results, the milling cutter edges were analyzed qualitatively by images obtained by optical microscopy and quantitatively by roughness measurements performed in the flank region, near the main edge. After the analysis of the cutting edges, two of the three brushed cutters were tested in machining in AISI P20 steel. During the tests, pauses were performed to verify the types of wear that occurred and the wear mechanisms causing them, in addition to measuring the flank wear (VB_{max}) of each cutting edge. This procedure was performed until the wear reached the predetermined end of life of $VB_{max} = 0.2$ mm. The quality of the surfaces generated by the milling cutters were also evaluated, for these analysis surface texture images and roughness measurements were performed. The variables evaluated by the milling cutters polished by rigid sponges, on the polished edges and of the machining tests performed, were also evaluated in cutters polished by flexible sponges and in cutters without treatment, aiming to compare the 3 different cutting edge conditions. The cutters brushed with rigid sponge had a lifespan 21.63 % shorter than the cutters without treatment, while the cutters brushed with flexible sponges returned a 6.92 % shorter service life. However, the cutters brushed with rigid sponge had the lowest occurrence of micro chipping, while the cutters without treatment had the highest occurrence. The lowest roughness values measured were those of the surfaces generated by the tools brushed with flexible sponge and there were no significant differences between the values measured on the surfaces generated by the tools brushed with rigid sponges and by the untreated tools. The textures of the surfaces generated by the tools brushed with rigid sponge, for the beginning of life, did not clearly present the groove marks generated by the passage of the tool, since the other conditions did not present significant differences between them. However, it is important to highlight that the results presented on this study for the machining tests, are only valid for the cutting conditions applied here, any change on these conditions would probably generate different results.

Keywords: Cutting edge treatment. Tool brushing. Straight end milling. AISI P20 Steel milling. Milling cutter lifespan.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de fresamento frontal e tangencial.....	19
Figura 2 - Fresamento concordante e discordante	20
Figura 3 - Modelos usuais de fresas de topo	20
Figura 4 - Comparação para diferentes números de gumes em fresas	22
Figura 5 - Construção geométrica de fresa de topo reto.....	23
Figura 6 - Caracterização do perfil de um gume arredondado	25
Figura 7 - Geometrias obtidas pelo tratamento de gume.....	25
Figura 8 - Comparação entre um gume afiado e um gume tratado	28
Figura 9 - Efeitos dos tratamentos de gume	29
Figura 10 - Efeito do arredondamento de gume quando comparado a um gume afiado.....	30
Figura 11 - Diferentes processos de tratamento de gume.....	32
Figura 12 - Cinemática da escovação com filamentos abrasivos	34
Figura 13 - Tipos de desgaste	38
Figura 14 - Desgastes e Avarias	39
Figura 15 - Curva padrão do comportamento de desgaste	41
Figura 16 - Parâmetro de rugosidade Ra	43
Figura 17 - Parâmetro de rugosidade Rz	44
Figura 18 - Parâmetro de rugosidade Ry	44
Figura 19 – Fluxograma da Ordem de Execução dos Experimentos	45
Figura 20 - Esponjas abrasivas	49
Figura 21 - Miniretífica e dispositivo utilizado para realizar os polimentos.....	50
Figura 22 - Posicionamentos para o processo de polimento	51
Figura 23 - Fresa de topo inteiriça de metal duro sem preparação.....	52
Figura 24 - Região e forma de medição da rugosidade	54
Figura 25 - Vista detalhada da esponja rígida	56
Figura 26 - Vista detalhada da esponja flexível	57
Figura 27 - Comparativo entre as fresas originais de fábrica e escovadas com esponja rígida.....	59
Figura 28 - Desgastes ocorridos nas fresas escovadas com esponja rígida.....	65
Figura 29 – Desgastes e avarias ocorridos nas fresas OF e escovadas com esponja flexível ..	66
Figura 30 - Textura e perfil de rugosidades gerados por fresa escovada com esponja rígida ..	68
Figura 31 - Textura e perfil de rugosidades gerados por fresa escovada com esponja flexível.....	69
Figura 32 – Textura e perfil de rugosidades gerados por fresa original de fábrica	70

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Organização dos Ensaios	47
Tabela 1 – Composição química do aço AISI P20.....	53
Tabela 2 – Rugosidades medidas nos gumes das fresas.....	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curvas do comportamento de desgaste.....	64
Gráfico 2 – Parâmetro de rugosidade Ra.....	71
Gráfico 3 – Parâmetro de rugosidade Rz1max.....	71
Gráfico 4 – Parâmetro de rugosidade Rz.....	72

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)
CBN	Nitreto de boro cúbico
EDM	<i>Electrical Discharger Machining</i> (Usinagem por Descarga Elétrica)
EDS	<i>Energy Dispersion Spectroscopy</i> (Espectrometria de energia dispersiva)
Esc. Flexível	Fresa escovada com esponja flexível
Esc. Rígida	Fresa escovada com esponja rígida
HSS	Aço de alta velocidade
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
OF	Original de fábrica
PCD	Diamante policristalino
PCBN	Nitreto de boro cúbico policristalino
TM	<i>Trade Mark</i> (Marca Comercial)
UCS	Universidade de Caxias do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

a_e	penetração de trabalho
a_p	profundidade de corte
$A\alpha$	flanco da ferramenta
$A\gamma$	face da ferramenta
b_n	comprimento do chanfro do gume
b_γ	comprimento do terreno do gume
<i>cut-off</i>	comprimento de amostragem
d	diâmetro da fresa
F_n	força normal
F_s	força cisalhante
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_1	comprimento de corte
l_2	comprimento total da fresa
l/d	relação comprimento-diâmetro da ferramenta
mm	milímetro
r	raio
rev	revolução
rpm	rotações por minuto
S	ponto de separação de fluxo de material
$S\alpha$	segmento do gume no flanco da ferramenta
$S\gamma$	segmento do gume na face da ferramenta
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
y_b	profundidade de contato radial
$^{\circ}C$	graus Celsius
Δr	recuo de ponta
α_0	ângulo de incidência ou folga
β_0	ângulo da cunha de corte
γ_b	ângulo de inclinação do chanfro ou terreno
γ_e	ângulo de saída efetivo
γ_0	ângulo de saída
μm	micrometro
φ	ângulo de deslocamento do vértice

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.2	Justificativa.....	15
1.3	Objetivo geral.....	16
1.4	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Usinagem.....	17
2.2	Fresamento	17
2.2.1	Fresamento de Topo	20
2.2.1.1	Macrogeometria de Fresas de Topo Reto	21
2.2.1.2	Mesogeometria e Microgeometria de Fresas de Topo Reto	23
2.3	Polimento de ferramenta de corte para Tratamento de Gume	27
2.3.1	Tipos de Tratamento de Gume	31
2.3.2	Tratamento de Gume por Escovamento.....	32
2.4	Usinabilidade.....	35
2.4.1	Mecanismos de desgaste, desgastes e avarias das ferramentas de corte.....	36
2.4.1.1	Principais Desgastes e avarias que ocorrem em operações de Fresamento.....	39
2.4.1.2	Vida da Ferramenta	40
2.4.2	Qualidade superficial	41
2.4.2.1	Textura.....	42
2.4.2.2	Rugosidade	43
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	Planejamento dos ensaios experimentais.....	45
3.1.1	Teste de fresamento	47
3.2	Polimento por escovamento.....	48
3.3	Ferramentas de corte utilizadas	52
3.4	Corpo de prova	53
3.5	Variáveis avaliadas e Equipamentos utilizados.....	53
4	RESULTADOS	56
4.1	Caracterização das Esponjas.....	56

4.2	Caracterização das Fresas Após o Escovamento.....	58
4.3	Vida útil das fresas	61
4.3.1	Comportamento de desgaste	61
4.3.2	Caracterização dos tipos de desgastes e dos mecanismos de desgaste.....	64
4.4	Qualidade superficial do corpo de prova	67
5	CONCLUSÃO.....	74
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem por fresamento é um método de fabricação de extrema importância para a produção dos mais variados produtos da indústria atual. A grande utilização do fresamento se dá por ser um processo de usinagem que apresenta elevada versatilidade na fabricação de peças e componentes com as mais variadas formas e geometrias, sendo capaz de gerar superfícies de alta complexidade.

A usinagem por fresamento, em função da sua grande utilização na indústria, necessita de constantes melhorias com foco na redução dos tempos, dos custos de fabricação e no aumento da qualidade dos produtos fabricados. Isso ocorre devido ao elevado nível de competitividade existente entre as indústrias da atualidade, que buscam um constante aprimoramento dos seus processos de fabricação.

No entanto, para que se possa alcançar esses objetivos, as ferramentas de corte utilizadas no fresamento tendem a trabalhar em condições de usinagem cada vez mais severas. Segundo Ost (2016), outro agravante da usinagem por fresamento é que esta se caracteriza pelo corte interrompido. Esse fato gera maiores oscilações mecânicas e térmicas na ferramenta se comparado com outros processos de usinagem, onde o corte normalmente é contínuo como no torneamento. Todos esses fatores influenciam na redução da vida útil das ferramentas de corte utilizadas no fresamento, as quais são denominadas de fresas. Sendo assim, buscou-se desenvolver métodos que melhorassem o desempenho das ferramentas de corte, resultando num aumento de vida útil dessas ferramentas e em uma melhor qualidade das superfícies geradas por elas.

Um método bastante estudado atualmente, que tem como objetivo melhorar o desempenho das ferramentas de corte é o polimento das mesmas com diferentes materiais abrasivos e com diferentes estratégias de aplicação desse polimento. Segundo Rodríguez (2009), esse método promove um tratamento no gume da ferramenta, reduzindo ou eliminando possíveis defeitos provenientes do processo de fabricação, como micro trincas, rebarbas e irregularidades. Esses defeitos podem resultar numa menor vida da ferramenta e em superfícies usinadas com parâmetros de rugosidade indesejados e texturas irregulares.

É neste contexto que este trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência de processos de polimento com esponjas abrasivas, em fresas de topo de metal duro inteiriças sem revestimento, na usinagem do aço AISI P20. Visando comparar o desempenho em usinagem de fresas polidas pelo processo de escovamento, foram utilizados dois tipos de esponjas abrasivas

distintas, sendo uma esponja flexível e uma esponja rígida. Para avaliar os resultados obtidos pelos processos de polimento empregados nas fresas foram feitas análises da geometria do gume das mesmas, como arredondamento e textura. Já o desempenho em usinagem das fresas, após o polimento, foi avaliado a partir da análise do comportamento de desgaste e da qualidade das superfícies geradas por elas.

1.2 Justificativa

A fabricação por usinagem é utilizada largamente em todo o mundo em aplicações variadas, das simples até as de alta complexidade. Estudar os fenômenos e métodos que afetam as aplicações de usinagem é muito importante, especialmente para as empresas que atuam nessa área (USINAGEM BRASIL, 2019).

Em função da alta competitividade da indústria atual há uma busca constante por melhorias nos processos, visando reduzir custos e tempos de fabricação e também melhorar a qualidade dos seus produtos.

Conforme publicação do site Usinagem Brasil (2019), a fabricação de moldes e matrizes se utiliza da aplicação de diversos processos de usinagem. Contudo, as ferramentas de corte mais utilizadas neste setor da indústria são as de fresamento. Isso ocorre devido às características específicas dos moldes e matrizes que englobam prevalência de componentes não rotativos, superfícies de perfil complexo, usinagem de cavidades que precisam de remoção de grandes volumes de material, etc...

Devido a todos esses fatores se faz tão necessária a realização deste trabalho, o qual busca o aprimoramento das ferramentas de corte utilizadas nos processos de usinagem por fresamento, pois é através destes aprimoramentos que se obtêm ganhos em relação à vida útil das ferramentas e também em relação à qualidade de superfície e de subsuperfícies geradas por elas. Assim, se reduz os tempos de trocas de ferramentas, aumentando a produtividade e a qualidade dos produtos fabricados.

Em função da carência de resultados na literatura que aborde a utilização de esponjas rígidas para o polimento de ferramentas, este trabalho comparou os resultados obtidos em fresas pelo processo de polimento por escovamento, utilizando dois tipos de esponjas abrasivas, sendo uma esponja flexível e uma esponja rígida. Desta forma foi confrontado os resultados obtidos por ambas na geometria do gume das fresas e no desempenho delas em usinagem. Assim, buscando chegar a resultados satisfatórios que possibilitem contribuir com melhorias na

usinagem por fresamento do aço AISI P20, o qual é bastante utilizado na fabricação de moldes e matrizes em geral.

1.3 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos processos de polimento com esponjas abrasivas em fresas de topo de metal duro, na qualidade da superfície usinada e no desgaste e vida da ferramenta no processo de fresamento do aço AISI P20.

1.4 Objetivos específicos

Com a intenção de atender o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o efeito do tratamento por esponja abrasiva flexível no gume das ferramentas de corte;
- b) Avaliar o efeito do tratamento por esponja abrasiva rígida no gume das ferramentas de corte;
- c) Avaliar os efeitos dos tratamentos por esponja abrasiva flexível e por esponja abrasiva rígida na qualidade das superfícies geradas pelas ferramentas tratadas;
- d) Avaliar os efeitos dos tratamentos por esponja abrasiva flexível e por esponja abrasiva rígida no desgaste e na vida das ferramentas tratadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem

A usinagem é um processo de fabricação que tem como objetivo atribuir forma, dimensões, acabamento ou uma combinação qualquer destes três itens a uma peça, pela remoção de material em forma de cavaco (ARGENTA, 2015).

O cavaco pode ser definido como: Quantidade de material retirada de uma peça por uma ferramenta, o qual se caracteriza por ter geometria irregular (MACHADO E SILVA, 2004).

Considerada bastante imprevisível, a usinagem é um processo complexo e simples ao mesmo tempo. É complexo em função da dificuldade em se determinar as condições e parâmetros ideais de corte. É simples, pois após definidas as condições e parâmetros ideais de corte ocorre a formação correta do cavaco, não havendo a necessidade de intervenções especiais do operador (MACHADO E SILVA, 2004).

2.2 Fresamento

Fresamento é um processo de fabricação por usinagem, onde o movimento de corte é circular, utilizando uma ferramenta de corte chamada de fresa, a qual normalmente apresenta múltiplos gumes dispostos de forma simétrica em torno de um eixo, gerando, em uma revolução, uma série de cavacos (STEMMER, 2005; DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2013).

As fresas podem apresentar uma grande variedade de geometrias e formas construtivas. Por exemplo, as fresas de corpo inteiriço que são construídas como uma única peça de um único material. Em contra partida existem as fresas intercambiáveis, nas quais são fixados insertos na região utilizada para o corte, em um suporte de aço, fazendo a substituição dos insertos conforme for necessário (KLOCKE, 2018).

O fresamento é caracterizado pelo corte interrompido (OST, 2016). Esse fato gera maiores oscilações mecânicas e térmicas na ferramenta se comparado com outros processos de usinagem onde o corte normalmente é contínuo, como no torneamento. Em consequência, o processo deve ser elaborado de forma que suporte a elevada variação dos carregamentos estáticos e dinâmicos (PAUCKSH, HOLSTEN, *et al.*, 2008).

No fresamento, na maioria das situações, enquanto a peça realiza o movimento de avanço o movimento de corte é realizado pela ferramenta, assim o eixo de giro se mantém em uma posição fixa. Entretanto, em uma operação de fresamento, a peça e a ferramenta podem realizar movimentos relativos independentes ou combinados. Este processo permite executar operações variadas, produzindo superfícies planas ou curvas, ranhuras, ressalto, roscas, engrenagens e outras configurações (STEMMER, 2005). Porém, no fresamento de peças com grandes dimensões usualmente o movimento de avanço e o movimento de corte são realizados pela ferramenta.

Para que os movimentos influentes no processo de fresamento sejam realizados, é necessária a utilização de uma máquina-ferramenta denominada de fresadora (STEMMER, 2005).

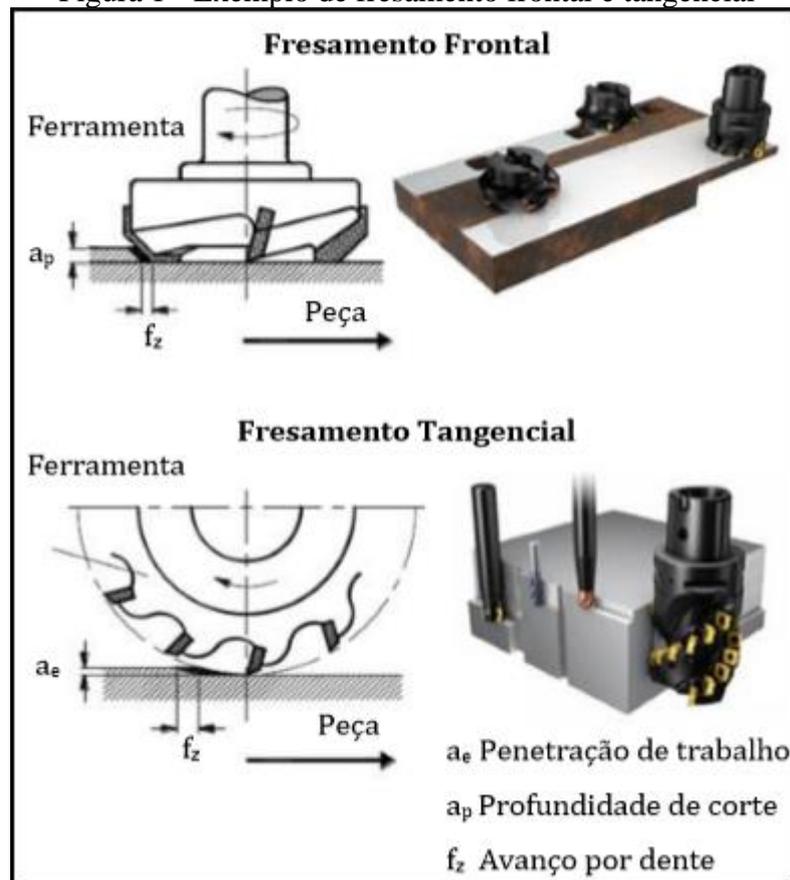
Conforme Zeilmann (2019), outras vantagens do fresamento podem ser destacadas como: capacidade de remover grandes volumes de material, grande variedade de ferramentas que podem ser utilizadas para gerar superfícies complexas, ampla variedade de formas e geometrias que podem ser usinadas e a boa qualidade das superfícies geradas.

O fresamento também apresenta a vantagem de ser um processo de usinagem onde se utiliza ferramentas que podem conter múltiplos gumes, proporcionando alta produtividade e com bons acabamentos das superfícies. Por consequência, existe a possibilidade de se trabalhar com elevadas velocidades de avanço, mantendo um avanço por dente f_z pequeno (COSTA, 2003).

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2013), pode-se classificar a usinagem por fresamento conforme o posicionamento do eixo árvore em relação à superfície usinada, ou conforme o posicionamento dos gumes utilizados na ferramenta que realizarão a remoção de material da peça. O fresamento pode ser classificado em função do eixo árvore como: fresamento horizontal, fresamento vertical ou fresamento inclinado. O fresamento também pode ser classificado conforme a disposição dos gumes em fresamento tangencial e fresamento frontal (FERRARESI, 1981). No fresamento tangencial os gumes utilizados para o corte situam-se na parte cilíndrica da fresa, em função disto a superfície gerada normalmente é paralela em relação ao eixo da ferramenta. Já no fresamento frontal, o corte é executado pela combinação dos gumes situados na parte cilíndrica e na região frontal da fresa, por consequência, a superfície resultante geralmente é perpendicular em relação ao eixo da ferramenta (STEMMER, 2005).

A Figura 1 ilustra o fresamento frontal e tangencial. As setas mostram o sentido de rotação da ferramenta e o sentido de avanço da peça em usinagem.

Figura 1 - Exemplo de fresamento frontal e tangencial



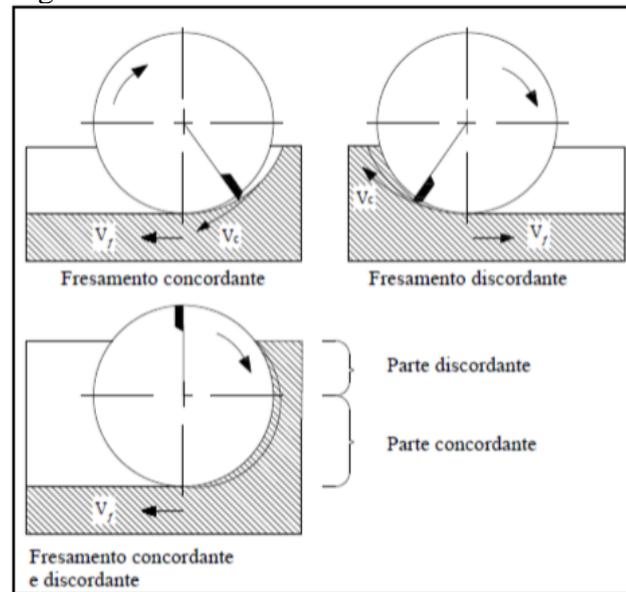
Fonte: Adaptado de Klocke (2018) e Sandvik Coromant (2017)

O processo de fresamento também pode ser classificado quanto ao sentido dos movimentos realizados. O fresamento é denominado concordante em operações que o movimento de corte e avanço tem a mesma direção e mesmo sentido. Já nas operações em que o movimento de corte e de avanço apresentam mesma direção, porém sentidos opostos, o fresamento é denominado discordante (FERRARESI, 1981).

No fresamento concordante a probabilidade de vibrações ocorrerem é menor, fazendo com que normalmente as superfícies geradas pelo mesmo apresentem uma qualidade superior se comparada às superfícies obtidas pelo fresamento discordante (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001).

Os fresamentos concordante ou discordante ocorrem de forma isolada um do outro apenas em operações em que o centro da ferramenta fica fora da superfície usinada. Este fato não ocorre na maioria das operações de fresamento, porque normalmente o centro da ferramenta se localiza sobre a região usinada da peça, e por consequência o fresamento que ocorre é ao mesmo tempo concordante e discordante (COSTA, 2003). A Figura 2 apresenta o fresamento concordante e discordante.

Figura 2 - Fresamento concordante e discordante



Fonte: Adaptado de König e Klocke (1997)

2.2.1 Fresamento de Topo

O fresamento de topo, geralmente, é bastante empregado na usinagem das mais variadas formas de superfícies. Na indústria de moldes e matrizes utiliza-se o fresamento de topo para gerar rebaixos, cavidades ou bolsões e contorno de perfis, seja em operações de desbaste ou de acabamento (GROOVER, 2017).

Com o intuito de atender os mais variados tipos de aplicações do fresamento de topo, fresas com diversas formas construtivas são fabricadas (REBEYKA, 2016). A Figura 3 apresenta algumas categorias de fresas.

Figura 3 - Modelos usuais de fresas de topo



Fonte: Adaptado de Serratools (2019)

No fresamento de topo, a fresa tem a tendência de ser o elemento mais flexível do sistema, pois normalmente a relação comprimento-diâmetro (l/d) é alta (WEINGAERTNER, SCHROETER, *et al.*, 2004).

Em função da fresa de topo ter a sua fixação realizada em um único ponto do seu corpo, somado a sua característica de baixa rigidez, ocorrem as deflexões, causadas pelas forças de usinagem. A deflexão gera uma inclinação na ferramenta, e este fenômeno é responsável pela geração de cavacos com diferentes espessuras no sentido axial, resultando em um impacto negativo no acabamento da peça, o que prejudica a produtividade e causa esforços não uniformes sobre os gumes (ARMAREGO e DESHPANDE, 1991).

Classifica-se o fresamento de topo reto pelo tipo de ferramenta utilizada. Esta ferramenta tem o seu lado frontal em forma plana, podendo ou não apresentar arestas de corte, as quais são chamadas de gumes secundários (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; KLOCKE, 2018).

O processo de fresamento de topo, se empregado na usinagem de superfícies planas, forma as mesmas por meio do gume secundário da fresa, porém a remoção de material efetiva na usinagem é realizada pelo gume primário. Então, em função da forma construtiva da fresa é que o fresamento de topo realiza as operações de usinagem combinando o fresamento frontal com o fresamento tangencial continuamente ao longo do corte (KLOCKE, 2018).

Ferramentas de corte de precisão devem ser descritas através de uma classificação em escalas, sendo macrogeometria e geometria do gume. A geometria do gume se subdivide em mesogeometria e microgeometria (RODRÍGUES, 2009).

2.2.1.1 Macrogeometria de Fresas de Topo Reto

A macrogeometria determina os ângulos de corte, raios de quina, quebra-cavacos, quantidade de gumes, o dimensional e outras superfícies funcionais da ferramenta. Para uma mesma aplicação da ferramenta estas características podem variar, dependendo do fabricante (RODRÍGUEZ, 2009; KLOCKE, 2018).

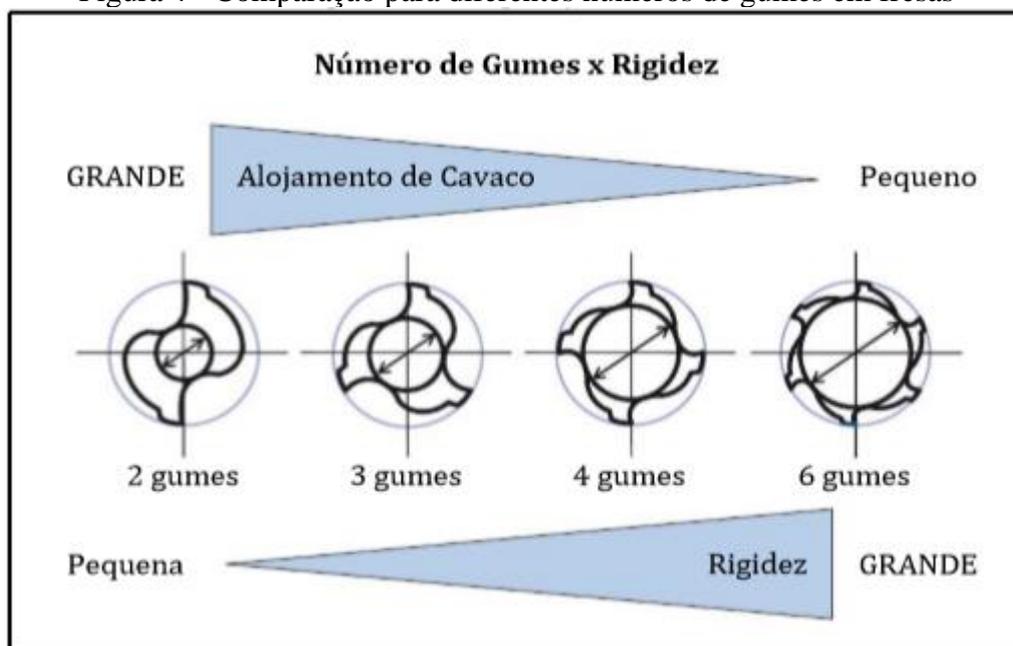
No fresamento de topo reto, as fresas podem ter variação no número e nos tipos de gumes. Na superfície cilíndrica das fresas, os gumes podem se apresentar de forma reta ou helicoidal. Para usinagens de acabamento é recomendado que o perfil do gume na parte cilíndrica da fresa seja contínuo, já para usinagens de desbaste o perfil do gume deve ser ondulado, isto facilita a quebra do cavaco. A quantidade de gumes de uma fresa influencia em

sua capacidade de acomodar e expelir cavacos, e também altera a dimensão do núcleo dela, que por sua vez influencia em sua rigidez. Quanto maior for a rigidez de uma fresa menor será a probabilidade de ela quebrar, pois sofrera deflexões menores (REBEYKA, 2016; KLOCKE, 2018; OSG, 2019).

Fresas com menor número de gumes são indicadas para operações de desbaste devido a sua maior capacidade de alojar os cavacos e também por apresentarem uma menor rigidez, uma vez que em operações de desbaste o foco é remover o maior volume de material possível no menor espaço de tempo, não havendo a necessidade de garantir tolerâncias dimensionais estreitas. No entanto, fresas com maior número de gumes são indicadas para operações de acabamento, em função da sua maior rigidez, já que este fato lhe garante maior precisão dimensional em usinagem.

A Figura 4 mostra a face frontal de fresas de topo reto com diâmetros externo iguais, porém tendo diferentes números de gumes, e por consequência o tamanho do núcleo também varia, este é demonstrado por um círculo na parte central de cada face.

Figura 4 - Comparação para diferentes números de gumes em fresas



Fonte: Adaptado de OSG (2019)

Fresas de topo reto apresentam em sua construção ângulos de grande influência na sua operação em usinagem. Estes ângulos são:

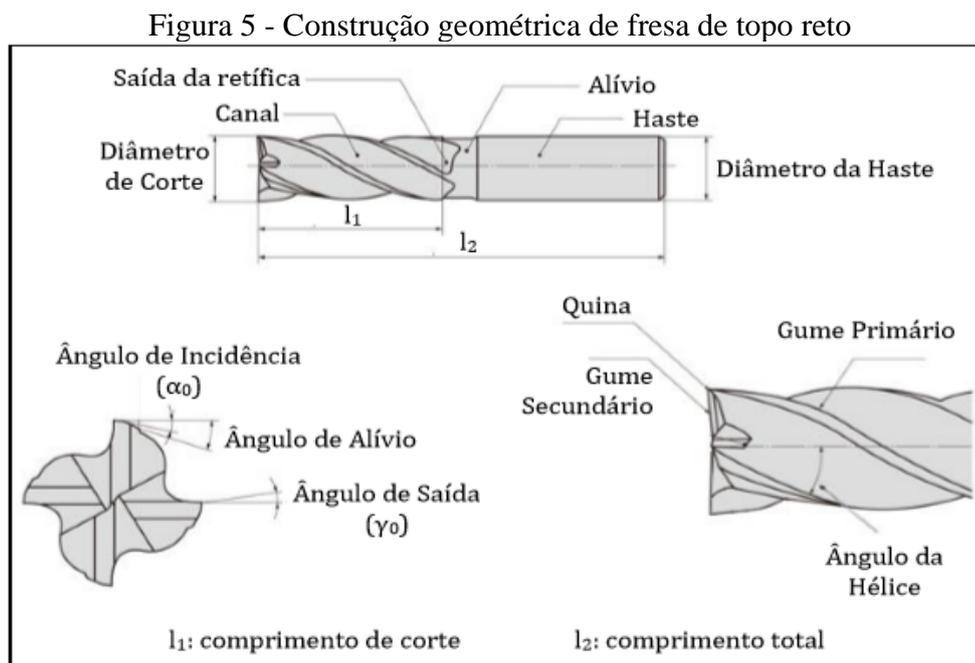
Ângulo de incidência ou folga (α_0) – É determinado entre a superfície usinada da peça e a superfície de folga da ferramenta. Sua principal função é evitar o atrito entre estas duas superfícies (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; FRACARO, 2017).

Ângulo de saída (γ_0) – É formado entre o plano de referência e a superfície de saída do cavaco. Tem influência direta na intensidade da força e potência solicitada no corte, no acabamento superficial e no calor gerado (MACHADO E SILVA, 1999).

Ângulo de cunha (β_0) – É o ângulo formado entre a face e o flanco (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; FRACARO, 2017).

Conforme Rodrigues (2005), as variações do tamanho do ângulo de folga como do ângulo de saída influenciam diretamente no tamanho do ângulo de cunha, e isto por sua vez está diretamente relacionado à resistência da cunha, que é responsável por elevar ou minimizar a sensibilidade da ferramenta aos choques.

A Figura 5 mostra uma fresa de topo reto com alguns detalhes sobre sua construção geométrica.



2.2.1.2 Mesogeometria e Microgeometria de Fresas de Topo Reto

Em usinagem, a mesogeometria e a microgeometria caracterizam a geometria do gume das ferramentas de corte. Alguns fatores devem ser considerados para que se possa definir uma geometria de gume adequada para uma aplicação específica. Estes fatores são: condição inicial do gume (sem tratamento), tipo de usinagem a ser aplicada, parâmetros a serem utilizados no processo, tipo de material a ser usinado, material da ferramenta, macrogeometria e tratamento da ferramenta de corte (RODRÍGUES, 2009).

A mesogeometria define o perfil gerado na superfície convexa do gume, formado por processos de tratamento de gumes. Sendo assim, a mesogeometria abrange detalhes no gume na ordem de 1 a 100 μm , como exemplo, pode-se citar o raio de arredondamento formado na superfície de conexão entre a face e o flanco da ferramenta (RODRÍGUES, 2009).

Os gumes podem ser determinados de maneira geral como afiados, arredondados ou chanfrados, através das últimas duas geometrias citadas pode-se gerar muitas outras. Os gumes afiados são aqueles que não passaram por nenhum processo de tratamento de gume em nenhum momento de sua fabricação ou pós-fabricação, eles são gerados por meio do processo de retificação da face e do flanco que formam a cunha de corte. Na prática, este tipo de gume não é realmente afiado, pois ele pode apresentar diferentes defeitos como rebarbas, entalhes e microlascamentos, por isso não existem parâmetros específicos para descrevê-lo (REILLY; MCCORMACK; TAYLOR, 2004 apud DENKENA; BIERMANN, 2014).

Os gumes arredondados normalmente são definidos por um arco de circunferência que é aproximado ao perfil da cunha de corte. Quando a cunha de corte apresenta uma assimetria em seu raio, devem-se ajustar dois ou mais arcos de circunferências para representar seu perfil (RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Para fazer a caracterização do gume pode-se destacar o parâmetro chamado de fator de forma, este é representado pela letra K e junto com o valor do raio do gume ele estabelece a orientação do arredondamento do gume (AURICH e EFFGEN, 2015).

A caracterização do gume pelo fator de forma estabelece medidas retilíneas para S_γ e S_α , onde S_γ representa o segmento do gume na face de escoamento do cavaco e S_α representa o segmento do gume no flanco. Ambos são dimensionados partindo do ponto de onde o seu respectivo raio inicia até um ponto máximo virtual, o qual é determinado pela consideração de que o gume é perfeitamente afiado. A partir desses valores pode-se calcular o fator de forma através da equação 1 (DENKENA et al., 2005 apud DENKENA; BIERMANN, 2014).

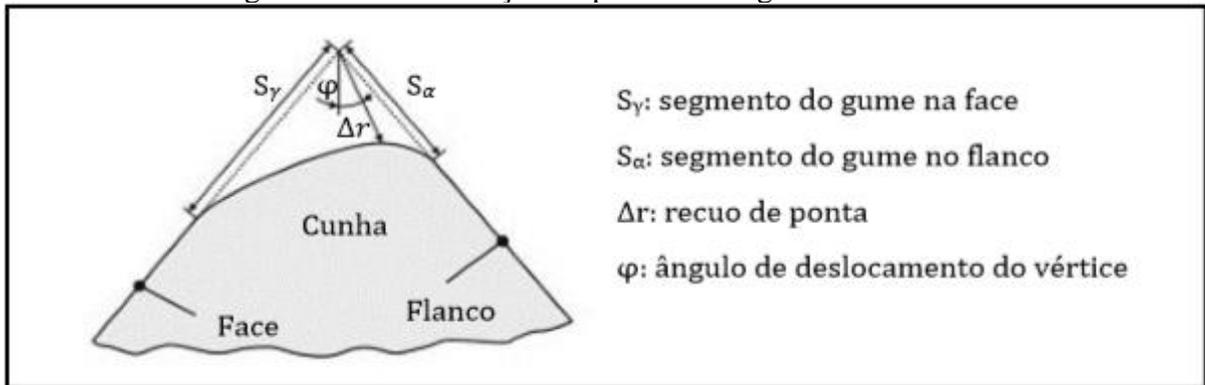
$$K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha} \quad (1)$$

Para arredondamentos simétricos teremos ($K=1$), quando o arredondamento se voltar para a face de escoamento de cavaco teremos ($K>1$), já quando o arredondamento se voltar para o flanco ($K<1$). Outro parâmetro de caracterização do gume que pode ser considerado é o recuo real, ele também é mensurado considerando uma cunha perfeitamente afiada e é representado por (Δr). O recuo real é utilizado junto com um ângulo (ϕ) que aponta o deslocamento angular

do vértice virtual de uma cunha idealmente afiada em relação ao ponto máximo do perfil do gume arredondado (DENKENA et al., 2005 apud DENKENA; BIERMANN, 2014).

A Figura 6 apresenta um esquema de um gume arredondado e os parâmetros necessários para caracterizá-lo e determinar o fator de forma.

Figura 6 - Caracterização do perfil de um gume arredondado

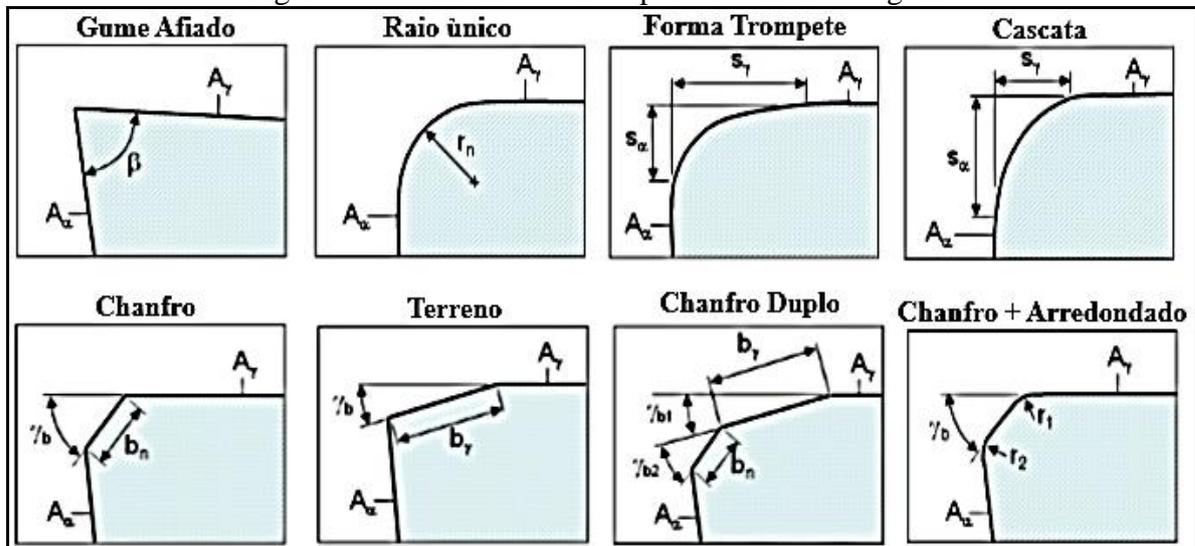


Fonte: Adaptado de Denkena et al.(2005 apud DENKENA e BIERMANN, 2014)

Os gumes chanfrados tem sua geometria definida por uma superfície plana (chanfro ou terreno) que faz a interseção entre a face (A_γ) e o flanco (A_α) da ferramenta. Se delimita o chanfro pelo seu comprimento (b_n) e o terreno pelo seu comprimento (b_γ), juntamente com o seu respectivo ângulo de inclinação (γ_b) (RODRÍGUES, 2009).

A Figura 7 demonstra as mais diversas geometrias que podem ser obtidas pelo tratamento de gume.

Figura 7 - Geometrias obtidas pelo tratamento de gume



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2009)

Os gumes arredondados são normalmente utilizados em acabamento final, semi-acabamento, usinagem de precisão e micro-usinagem, sendo comumente aplicados em ferramentas de diamante, PCD (diamante policristalino), HSS (aço de alta velocidade) e metal duro. Em contra partida, os gumes chanfrados são geralmente aplicados em torneamento duro, corte pesado e corte interrompido, e são normalmente aplicados em ferramentas de CBN (nitreto de boro cúbico), PCBN (nitreto de boro cúbico policristalino) e cerâmica (RODRÍGUES, 2009).

A microgeometria também caracteriza a geometria do gume, como já comentado anteriormente. Ela é responsável por tratar das rugosidades e texturas da superfície do gume e nas suas proximidades, contendo detalhes superficiais com grandeza de até 2 μm . As propriedades de rugosidade e textura do gume são influenciadas primeiramente pelo material da ferramenta de corte, mas também pelo processo de fabricação e por todos os parâmetros utilizados na confecção da ferramenta. Destes podemos citar: o rebolo utilizado, sentido de retificação, velocidades e profundidades de corte (RODRÍGUES, 2009).

A microgeometria é bastante importante em análises de ferramentas que irão passar por algum processo de revestimento após a sua fabricação, pois ela abrange detalhes que envolvem a topografia do gume, além de influenciar no tipo de contato que ocorre entre a ferramenta e a peça, na forma como o fluxo do cavaco ocorrerá e de que maneira irá se apresentar o comportamento de desgaste (KLOCKE, 2018).

Pela análise de perfis de rugosidades são avaliados os entalhes e as pequenas variações superficiais decorrentes no gume. Desta forma, propõe-se uma comparação quantitativa da topografia gerada pelo processo de fabricação da ferramenta, ou por algum tipo de tratamento de gume, assim propiciando aprimoramentos nos processos de fabricação de ferramentas de corte (RODRÍGUES, 2009).

Para avaliar a superfície do gume são utilizados métodos de medição um tanto quanto complexos, como medições por métodos ópticos ou de contato, os quais analisam as características superficiais de forma paralela ao gume em plano ortogonal ao seguimento de interesse (RODRÍGUES, 2009).

Existem técnicas multifocais e escaneamentos que permitem avaliar o gume e as superfícies próximas a ele, através de representações em modelos 3D. Outro método que pode ser utilizado para a caracterização do gume é a utilização de imagens bidimensionais de alta precisão, obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV), no entanto várias outras técnicas podem ser utilizadas (DENKENA e BIERMANN, 2014).

2.3 Polimento de ferramenta de corte para Tratamento de Gume

Atualmente, existem diversos processos destinados a executar polimento em ferramentas de corte. Este polimento tem como objetivo promover uma preparação no gume das ferramentas através da remoção sistemática de material. Contudo, o objetivo do tratamento de gume é criar uma geometria no gume, alterar a microtopografia e mudar a rugosidade e textura presentes na superfície da ferramenta, com o propósito de aperfeiçoar o desempenho da mesma. Assim sendo, o tratamento gera uma forma mais bem definida no gume, pois ele corrige defeitos e reforça o mesmo. No entanto, os fatores de maior importância nos processos de tratamento de gume são a precisão e a repetitividade (RODRÍGUES, 2009).

Como já mencionado anteriormente neste trabalho, os gumes podem ser classificados em função de seu raio. Dependendo do processo de polimento empregado, os raios variam dentro de três faixas de tamanho distintas. Inicialmente, tem-se os raios da faixa de 5 μm , estes são obtidos através do processo de retificação, sem um posterior tratamento, e abrangem as ferramentas afiadas. Em seguida, tem-se os raios da faixa de 5 μm a 20 μm , estes são obtidos pelos processos de tratamento com jatos abrasivos ou acabamento por arraste. Finalmente, os raios superiores a 20 μm , os quais são obtidos por processos de tratamento como o escovamento (PAUCKSH; HOLSTEN; *et al*, 2008; SOMMER, 2013).

Os gumes afiados apresentam uma boa capacidade de corte, contudo como já comentado neste trabalho, na prática, os gumes não são idealmente afiados, e apresentam defeitos como irregularidades, microlascamentos e rebarbas, resultantes de seu processo de fabricação. Estes defeitos ocasionam uma alta instabilidade da borda, diminuindo a vida útil e elevando a chance de ocorrer falha prematura da ferramenta (DENKENA; BIERMANN, 2014; KLOCKE, 2018).

Conforme Rodríguez (2009), a aplicação de processos de tratamento de gume altera as características da mesogeometria e da microgeometria da cunha de corte, isto propicia uma melhora na qualidade da adesão dos revestimentos nas superfícies da ferramenta.

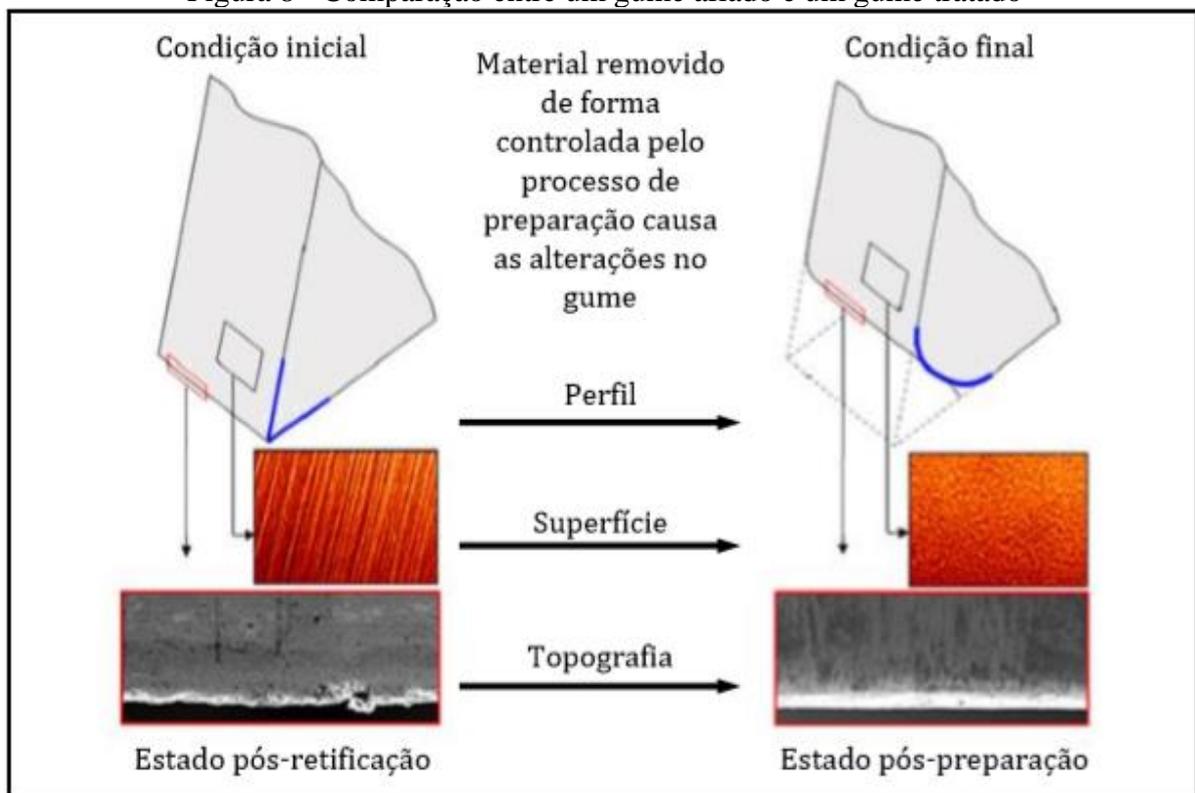
Outras vantagens dos tratamentos de gume citadas por Klocke (2018), é que eles geram uma maior homogeneidade superficial no gume, promovendo uma maior estabilidade contra os carregamentos termomecânicos, aumentando a vida útil da ferramenta por reduzir a ocorrência e intensidade dos desgastes, resultando em uma maior confiabilidade e qualidade do processo de usinagem.

Pelo fato da preparação do gume promover uma maior estabilidade contra os carregamentos termomecânicos, sendo ela realizada de forma sistêmica e controlada, irá

apresentar vários objetivos fundamentais como: adicionar resistência à aresta de corte, reduzir os lascamentos do gume, eliminar defeitos da aresta de corte, ampliar a vida útil da ferramenta, preparar as superfícies da ferramenta para deposição de revestimento e aumentar a qualidade da peça usinada (precisão, acabamento superficial) (RODRÍGUES, 2009). No entanto, os tratamentos de gume nem sempre apresentam bons resultados, pois podem ter impactos negativos na vida da ferramenta (OST, 2016).

Diversos trabalhos foram realizados buscando uma melhor compreensão das relações existentes entre o tratamento de gume e seu desgaste, durante o corte. No trabalho realizado por Ventura et al. (2015), onde na operação de torneamento interrompido de um aço endurecido, foi avaliada a influência da geometria do gume sobre o desgaste da ferramenta. Este estudo mostrou que a carga mecânica e o desgaste se elevam com o aumento do arredondamento do gume e a redução do fator de forma. Com isso, pode-se concluir que, normalmente, quando o arredondamento tende para o flanco da ferramenta os desgastes geralmente são maiores. A Figura 8 mostra a comparação entre um gume afiado e um gume tratado.

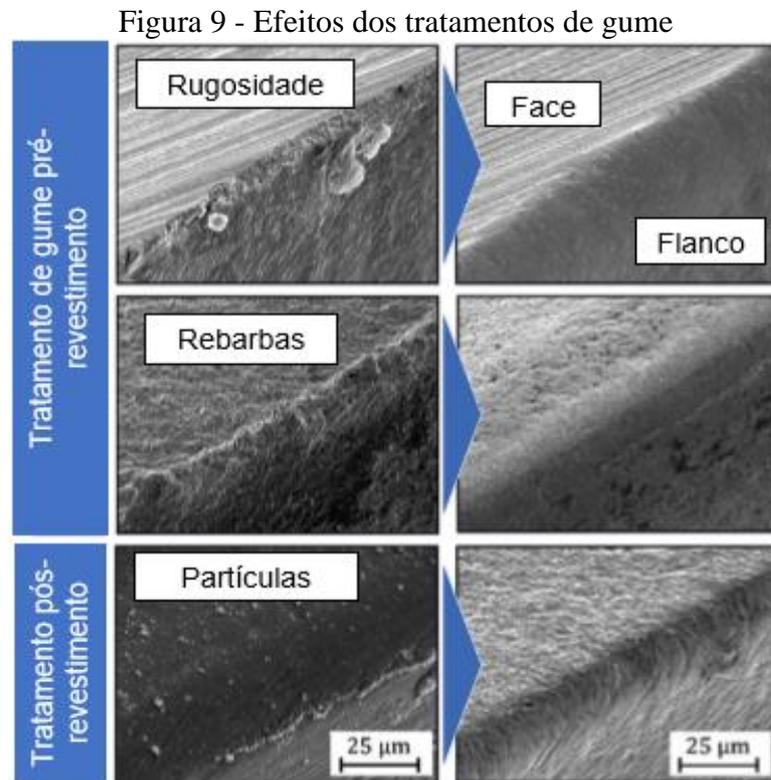
Figura 8 - Comparação entre um gume afiado e um gume tratado



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009)

A aplicação dos tratamentos de gume pode trazer benefícios tanto para ferramentas sem revestimento, quanto para ferramentas revestidas (ZANELLA, 2018). A Figura 9 compara os

principais efeitos dos tratamentos de gume em ferramentas sem revestimento, com os efeitos gerados em ferramentas revestidas.



Fonte: Adaptado de Bassett, Köhler e Denkena (2012)

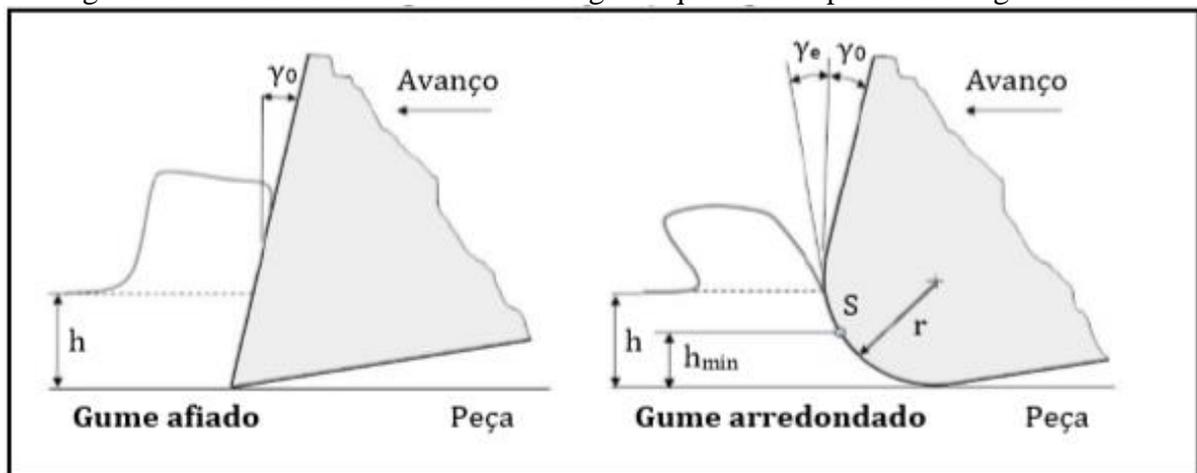
Os estudos geralmente atribuídos pela mecânica do corte consideram um gume idealmente afiado, no qual pela face da cunha de corte a espessura do cavaco escoava de forma ideal. No entanto, quando a cunha de corte apresenta algum arredondamento, acontece uma mudança de interação entre ferramenta, peça e cavaco. O tratamento de gume ocasiona mudanças na distribuição das forças de corte, temperatura, formação de cavaco e integridade superficial da peça (RODRÍGUES, 2009).

Conforme Bergmann et al (2019), o ângulo de saída efetivo (γ_e) sofre uma alteração em função do arredondamento do gume da ferramenta, pois o arredondamento promove uma modificação do contato entre ferramenta e peça, alterando a formação e o fluxo de cavaco. No corte realizado por gumes arredondados existe um ponto de separação (S) para o fluxo de material. Admite-se que acima desse ponto o material escoava para o cavaco, porém o material que fica abaixo desse ponto é recalçado pela ferramenta contra a superfície usinada, formando a superfície da peça. O conceito de limite ou espessura mínima de cavaco (h_{min}) não removido pela ferramenta é determinado por esse comportamento de recalque de material, o qual é comprimido contra a superfície da peça e lateralmente além da ferramenta.

No corte, a força resultante é distribuída na área de contato entre a ferramenta e o material a ser retirado. Apenas uma parcela da força de corte age diretamente no gume conforme a ferramenta avança. Na área de contato, localizada abaixo do ponto S do gume, surge uma nova componente de força que não contribui para o corte, a qual irá atuar no gume e no flanco da ferramenta. Devido a isto, a energia específica de corte é maior para gumes preparados em comparação aos sem preparação, pois para os gumes preparados o valor da espessura do cavaco deformado é baixo (RODRÍGUES, 2009).

A Figura 10 demonstra como ocorre o fluxo de material no corte com gumes afiados e com gumes arredondados, e também apresenta a espessura mínima de corte (h_{\min}) para um gume preparado e o ponto de separação de fluxo de material (S).

Figura 10 - Efeito do arredondamento de gume quando comparado a um gume afiado



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009)

Os estudos realizados ao longo dos anos provam que geralmente uma ferramenta que teve seu gume tratado apresentará grandes benefícios, no entanto os melhores resultados de desempenho de uma ferramenta serão obtidos quando ela for preparada baseando-se em parâmetros de corte específicos para a usinagem de um determinado material. Este fato é o motivo pelo qual ainda ocorram estudos baseados neste tema (DENKENA e BIERMANN, 2014).

Denkena, Koehler e Rehe (2012), analisaram como o desgaste da ferramenta e a integridade superficial da peça são afetados pela geometria do gume em uma operação de fresamento do aço 42CrMo4. O estudo constatou que as ferramentas tratadas apresentaram uma maior vida, mostrando melhores resultados as ferramentas com $K=1$ e $S\alpha=S\gamma=30 \mu\text{m}$. Com isso, se concluiu que geralmente o arredondamento simétrico promove um aumento da vida útil das ferramentas tratadas se comparadas as não tratadas.

Conforme Bassett, Köhler e Denkena (2012), insertos revestidos tratados pelo processo de escovação atingiram o fim de vida previamente determinado de 0,2 mm para o desgaste de flanco sem a ocorrência de lascamentos, porém este fato não aconteceu com os insertos sem preparação, os quais apresentaram lascamentos esporádicos.

Em gumes onde o fator de forma tende para o flanco da cunha ($K < 1$), prevalece a dominância do desgaste de flanco. Isto ocorre porque o maior segmento de raio fica para esse lado, promovendo o aumento da área de contato, o que resulta no aumento do atrito e das cargas térmicas entre flanco e peça. Sendo o desgaste de flanco e a vida útil das fresas relacionados diretamente ao tamanho do segmento S_α , pode-se minimizar este desgaste diminuindo o tamanho desse segmento através da utilização de ferramentas com fator de forma $K > 1$, onde o segmento S_γ é maior, assim não influenciando o desgaste de flanco, mas intensificando a formação do desgaste de cratera, o qual ocorre em menores taxas no fresamento (BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012; DENKENA; KOEHLER; REHE, 2012; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Arredondamentos tendendo para o flanco promovem maior vida útil em usinagens de aços de alta dureza e abrasividade (DENKENA, KOEHLER e REHE, 2012).

2.3.1 Tipos de Tratamento de Gume

Os processos de tratamento de gume das ferramentas de corte são cada vez mais empregados pelas indústrias, devido à alta demanda por produtividade e confiabilidade de seus produtos (DENKENA e BIERMANN, 2014). Processos tecnológicos distintos são empregados em cada tipo de tratamento de gume. Estes processos se utilizam de diferentes fontes de energia para realizar a remoção de material, sendo eles classificados em três categorias diferentes: processos mecânicos, térmicos e químicos (BORDIN, 2013). A Figura 11 mostra diferentes processos de tratamento de gume para as diferentes formas de energia utilizadas.

Os processos de tratamento de gume mais aplicados, geralmente, são a usinagem por jato abrasivo, a laser, por descarga elétrica (EDM), acabamento por arraste em mídias abrasivas, polimentos por abrasivos livres e escovação. Atualmente, dependendo da aplicação em que será submetida a ferramenta, e da preparação que se deseja obter em seu gume, é sabido qual processo de tratamento de gume que melhor atende algumas necessidades de topografia e de geometria. Isto ocorre porque cada processo promove diferentes características no gume, pois em processos distintos acontecem diferentes interações com a ferramenta. Contudo, para fazer

a escolha do processo, é preciso considerar as tolerâncias requeridas, reprodutibilidade e capacidade de produção do mesmo (BUCKELL, 2019). A Figura 11 mostra diferentes processos de tratamento de gume para as diferentes formas de energia utilizadas.

Figura 11 - Diferentes processos de tratamento de gume



Fonte: Adaptado de Bordin (2013)

2.3.2 Tratamento de Gume por Escovamento

O tratamento de gume por escovamento é um processo de usinagem que se caracteriza por realizar o corte com ferramenta de geometria não definida. As escovas possuem forma circular e são divididas basicamente em rodas ou discos, podem ser fabricadas de aço, fibra natural ou filamentos de nylon. No tratamento de gume as escovas normalmente utilizadas são as fabricadas com filamentos de nylon (RODRÍGUES, 2009).

Os filamentos de nylon são produzidos pelo processo de extrusão. Nestes filamentos, entorno de 30 a 40% do volume é formado por grãos abrasivos, os quais apresentam a função de remover o material da peça. As escovas são comumente classificadas pelo tamanho dos grãos que as compõem (BASSETT, KÖHLER e DENKENA, 2012). No entanto, em estudos científicos para caracterizar a presença do abrasivo, também são avaliados o grau de dispersão de tamanhos e a probabilidade de aglomeração dos grãos. A técnica de espalhamento de luz dinâmico é uma maneira de fazer esta análise (MATHAI e MELKOTE, 2012) (OVERHOLSER, STANGO e FOURNELLE, 2003) (STANGO, 1999) (TIKAL, 2009).

Os grãos abrasivos mais utilizados junto com os filamentos de nylon são o carboneto de silício (SiC) e o óxido de alumínio (Al_2O_3). Outras alternativas são o CBN (nitreto cúbico de boro) e PCD (diamante policristalino) (RODRÍGUES, 2009).

O escovamento com filamentos de nylon apresenta uma limitação que é imposta pela temperatura no decorrer do processo, pois existe a possibilidade de o filamento fundir caso a sua temperatura de fusão seja alcançada, fazendo com que o nylon seja depositado sobre a região escovada.

Conforme Overholser, Stango e Fournelle (2003), e Bassett, Köhler e Denkena (2012), o ponto de fusão do filamento de nylon fica entorno de 210 e 225 °C respectivamente. Segundo Stango (1999), o processo de escovamento com filamentos de nylon deve ser aplicado utilizando velocidades de rotação menores que 13,20 m/s, para evitar que se atinja a temperatura de fusão do nylon.

Na preparação de gumes em série, dentro das indústrias, o processo é umidificado por óleos que não degradem o filamento, assim evitando que se atinja a temperatura de fusão do mesmo (KLOCKE, 2018).

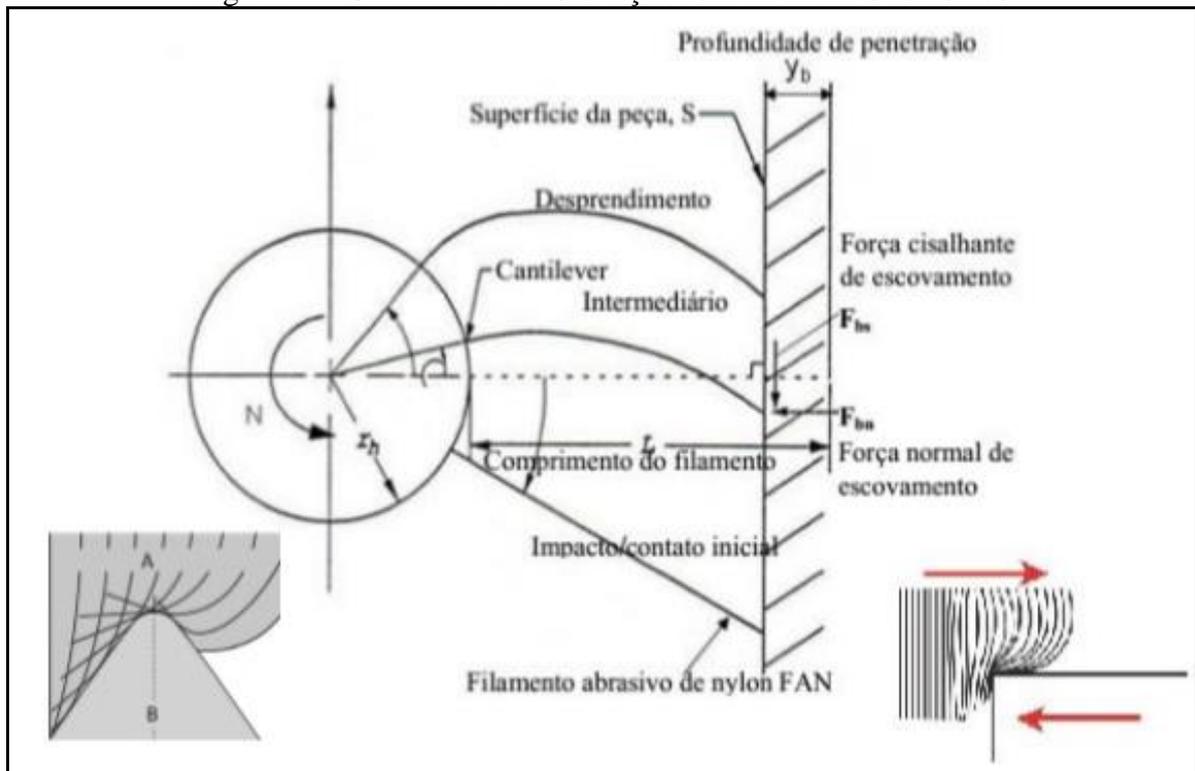
As escovas de filamentos de nylon trabalham removendo pequenas quantidades de material, e melhoram o acabamento superficial dos gumes. Os filamentos de nylon abrasivos, durante o trabalho, à medida que se desgastam contra a superfície, expõem constantemente novos grãos abrasivos influenciando a eficiência da escovação durante a vida da escova (RODRÍGUES, 2009).

Microgeometrias com raios definidos de 0,005 a 0,15 mm são produzidas por este processo, além de reduzir a rugosidade da superfície de saída da ferramenta, melhorando assim o escoamento de cavacos. Porém, para gerar um arredondamento regular e reprodutível é necessário ter uma tecnologia bem definida (TIKAL, 2009).

A forma de contato entre o filamento e uma superfície plana, demonstrado na Figura 12, ocorre de modo ortogonal (orientação perpendicular), em três posições distintas: local inicial, intermediário e de desprendimento. A ponta do filamento exerce uma força de usinagem sobre a superfície da peça, esta força se decompõe em: normal (F_n) e cisalhante (F_s) (OVERHOLSER, STANGO e FOURNELLE, 2003).

O contato com geometrias semelhantes à de um gume também é demonstrado à esquerda onde A, representa os filamentos e B o gume, mostrando como ocorre a deformação dos filamentos. À direita observa-se a orientação do movimento entre os filamentos e a peça a ser polida.

Figura 12 - Cinemática da escovação com filamentos abrasivos



Fonte: Adaptado de Bordin (2013) e Tikal (2009)

Trabalhos anteriores a este, como o de Ost (2016) e Buckell (2019), realizaram seus estudos utilizando o processo de tratamentos de gume por escovação com filamentos de nylon abrasivos. Porém, diferente do escovamento tradicional onde os filamentos de nylon das escovas são lineares, nesses trabalhos foram utilizadas escovas flexíveis nas quais os filamentos de nylon são dispostos como um emaranhado.

Estas escovas são encontradas em lojas de ferragens e materiais para construção, onde são fornecidas como folhas de acabamento Scotch-Brite™ 3M, sendo formadas por uma manta não tecida composta de fibras sintéticas de nylon, as quais apresentam microabrasivos aderidos pelo uso de uma resina à prova d'água. Diversos tipos de folhas de acabamento são encontrados, sendo eles classificados conforme sua granulometria e o tipo de abrasivo (BUCKELL, 2019).

Conforme o estudo realizado por Ost (2016), os fios de nylon que compõem este tipo de esponja têm diâmetro aproximado de 50 μm . Estima-se que o processo de fabricação da esponja ocorre primeiramente pela fabricação da sua malha dando forma ao emaranhado de fios que a compõe. Após, um material abrasivo é depositado sobre os fios, aderido ao fio, sendo composto de cristais com dimensões variadas que possuem um aspecto fragmentado alternando de aproximadamente 1 μm a 10 μm .

No trabalho de Buckell (2019), foram realizados testes aplicando o processo de escovamento em fresas de metal duro sem revestimento. Para estes foi variado o tipo de abrasivo que compõem as escovas, a rotação do disco da escova, a profundidade de contato entre a escova e a fresa e a inclinação entre a face da escova e o gume da fresa. Com os resultados dos testes concluiu-se que a melhor combinação dessas variáveis ocorreu com a utilização de escovas compostas pelo abrasivo SiC, rotação do disco de 6000 rpm, profundidade de contato 1,0 mm e inclinação entre face e gume de 15 °, pois essa combinação de variáveis retornou em um gume mais homogêneo, mais simétrico e com um arredondamento mais próximo dos valores indicados pela literatura.

Nos estudos realizados por Ost (2016), foram comparados três tipos de microgeometrias em gumes de fresas, geradas por processos de tratamento distintos os quais são: acabamento por arraste, polimento por escovamento e estado original de fábrica. De maneira geral, o acabamento por arraste apresentou os melhores resultados, pois gerou gumes mais homogêneos.

2.4 Usinabilidade

A usinabilidade descreve todas as dificuldades que podem ocorrer na usinagem de um determinado material, pois ela abrange todas as características de um material que influenciam no desempenho e resultados dos processos de usinagem. Devido a isto, a usinabilidade é avaliada a partir de análises do processo de fabricação, do material da ferramenta e das condições de corte (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Conforme Stemmer (1995) e Klocke (2018), uma forma de avaliar a usinabilidade é a partir de critérios essenciais, sendo estes avaliados de forma conjunta ou isolada. Os critérios comumente utilizados são: a vida da ferramenta, forças de usinagem, qualidade superficial da peça e formação de cavaco.

Entre os critérios citados acima, a vida da ferramenta é o mais utilizado para testes de usinabilidade. Quando este critério é adotado, os testes de usinabilidade acontecem até que a ferramenta atinja o fim de vida, ou até que ela atinja um valor de desgaste previamente determinado (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003). Segundo Souza et al. (2005), deve-se ter cuidado para determinar a usinabilidade de materiais, pois considerando um determinado critério os materiais podem apresentar uma ótima usinabilidade, porém ao realizar uma pequena alteração em parâmetros ou no critério a ser trabalhado, os resultados podem ser bem diferentes.

É importante salientar que a usinabilidade de um material depende também das condições de usinagem, e não apenas das características do material.

2.4.1 Mecanismos de desgaste, desgastes e avarias das ferramentas de corte.

Durante o processo de corte, por ocorrer o contato e escorregamento de material com altas pressões e temperaturas, podem ser gerados diversos tipos de desgastes e avarias na ferramenta, isto resulta na redução da eficiência de corte (STEMMER, 1995).

Define-se o desgaste em ferramenta como a modificação da sua forma original em função da perda contínua e progressiva do material que a constitui, ocorrendo em pequenas proporções, as quais são em nível atômico ou em nível de grão do material (MACHADO, ABRÃO e COELHO, 2015). Em uma operação de usinagem, o tipo de desgaste que irá prevalecer dependerá do material que será usinado, do material da ferramenta e das condições de corte (KISHAWY, DUMITRESCU, *et al.*, 2005). De maneira geral, os principais mecanismos causadores de desgastes em ferramentas de corte são: abrasão, adesão, difusão e oxidação (STEMMER, 2005; KÖNIG e KLOCKE, 1997).

A abrasão mecânica ocorre pelo atrito exercido por partículas duras presentes na superfície usinada da peça ou no cavaco, sendo agravada pelas altas pressões e temperaturas existentes entre a peça e a ferramenta durante o corte (KLOCKE e KÖNIG, 2008; STEMMER, 1995). Com o aumento da propriedade de dureza à quente da ferramenta, se diminui a tendência do fenômeno de abrasão ocorrer (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001; SHAW, 1984).

A adesão é um mecanismo de desgaste que ocorre devido à combinação de baixas temperaturas ocasionadas por baixas velocidades de corte, aliadas a cargas moderadas e a um constante contato entre duas superfícies metálicas (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999). O mecanismo de adesão causa a aderência de material da peça na superfície da ferramenta, este material aderido ao se desprender carrega junto com ele parte do material da ferramenta, causando o desgaste da mesma (STEMMER, 1995). Para minimizar os efeitos da adesão é recomendado utilizar fluídos de corte com maior poder lubrificante, ou ferramentas com revestimentos que possuam um menor coeficiente de atrito (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001; SHAW, 1984).

A difusão é causada pela afinidade química existente entre o material da ferramenta e o material da peça, sendo agravada pelo aumento da velocidade de corte, pois isto gera uma elevação da temperatura e da pressão no corte. O fenômeno da difusão consiste na migração de

átomos de um metal para o outro (KÖNIG e KLOCKE, 1997). Contudo, para controlar esse mecanismo de desgaste se recomenda utilizar ferramentas com revestimento de óxido de alumínio, pois este contribui com uma considerável melhora na estabilidade química da superfície de saída da ferramenta, área onde esse mecanismo mais atua (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001; SHAW, 1984). Outra forma de controlar a difusão é utilizar ferramentas de materiais que não possuam afinidade química com o material da peça a ser usinada.

A oxidação ocorre com a maioria dos metais, principalmente quando estes são expostos a grandes temperaturas em ambientes que contenham ar e/ou água. Esse mecanismo de desgaste normalmente atua na extremidade do contato da aresta de corte com a peça, pois é nessa região que o oxigênio e o fluido lubrificante têm mais acesso durante a usinagem. Assim como na difusão, ferramentas revestidas com óxido de alumínio resistem bem a esse mecanismo de desgaste (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001; SHAW, 1984).

A ferramenta de corte tem sua geometria original alterada pelo desgaste, o qual altera a região de contato na interface peça-ferramenta. Assim sendo, acontece o aumento da geração de calor do processo, aumento das forças de usinagem e elevação das deformações plásticas (MACHADO, COELHO, *et al.*, 2009).

Os tipos de desgaste mais comuns são: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe.

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, sendo causado preferencialmente pelo mecanismo de abrasão. Este tipo de desgaste é medido pelo valor médio do desgaste de flanco (VB) e pelo valor máximo do desgaste de flanco (VB_{max}).

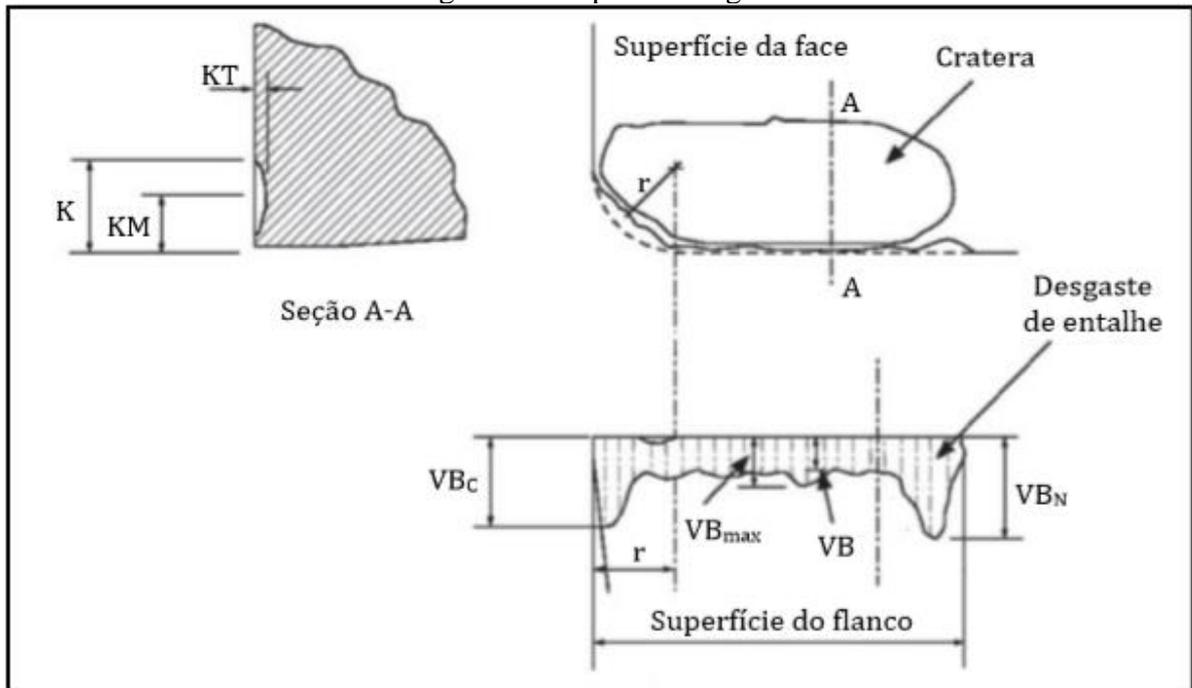
O desgaste de cratera atinge a superfície de saída da ferramenta sendo causado preferencialmente pelo mecanismo de difusão, o qual é ativado pelo atrito entre o cavaco e a face da ferramenta. Esta forma de desgaste é caracterizada pela sua largura (KB), profundidade (KT) e distância do centro à aresta de corte (KM).

O desgaste de entalhe normalmente se forma no limite da aresta que condiz com a profundidade de corte, e é causado preferencialmente pelo mecanismo de oxidação. Este tipo de desgaste é medido pela sua largura (VB_N).

O desgaste de ponta da ferramenta também pode ser mensurado pela sua largura (VB_C) (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

A Figura 13 demonstra os tipos de desgaste que normalmente ocorrem em ferramentas de corte.

Figura 13 - Tipos de desgaste



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

Diferentemente dos desgastes, as avarias ocorrem de forma intermitente quando parte da ferramenta se desprende repentinamente. Normalmente os mecanismos que causam as avarias são de origem térmica ou mecânica (FERRER, 2006).

As trincas são avarias que podem ser de origem térmica ou mecânica, sendo causadas principalmente por carregamentos térmicos cíclicos ou por impactos de entrada e saída da ferramenta na peça. A propagação e formação das trincas tem relação direta com a tenacidade do material da ferramenta, pois quanto maior for à tenacidade do material melhor ele irá suportar carregamentos térmicos cíclicos e impactos. Por consequência, as trincas ocorrem com relativa frequência em materiais de natureza frágil (CALLISTER, 2003). Outro fator que influencia o surgimento das trincas é o corte interrompido, pois este provoca variações cíclicas de temperatura na ferramenta além de causar impactos devido à entrada e saída do gume na peça. Conforme Trent (2000), no processo de fresamento, em razão da entrada e saída do gume no corte, o mesmo é aquecido e resfriado de forma cíclica causando um processo alternado de expansão e contração do material da ferramenta, formando as trincas. Uma refrigeração desfavorável favorece o surgimento das trincas. A evolução das trincas pode gerar avarias maiores como lascamentos e quebra da aresta de corte.

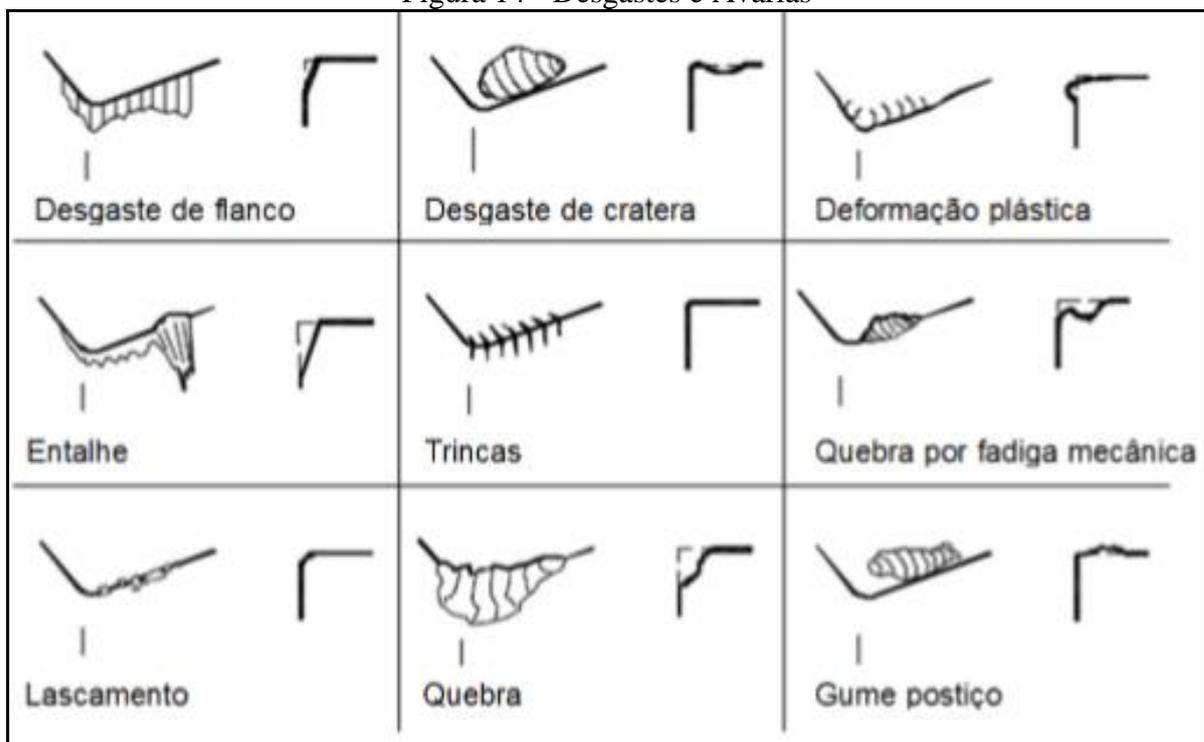
As trincas de origem térmica ocorrem de forma perpendicular à aresta de corte, no entanto, quando possuem origem mecânica ocorrem de forma paralela à aresta (LIMA e MELO, 2013; FERRARESI, 1977).

O lascamento, da mesma forma que a trinca, é causado por carregamentos térmicos cíclicos ou por impactos de entrada e saída da ferramenta na peça e é bastante influenciado pela tenacidade do material da ferramenta e pelas condições de refrigeração, sendo agravado pelo corte interrompido (MELO, VIANA, *et al.*, 2005). No entanto, o lascamento também pode ser causado pela adesão do material usinado na aresta de corte. Quando esse material aderido se desprende, leva parte do material que constitui a ferramenta. Esta adesão de material na ferramenta é chamada de aresta postiça (SILVEIRA, 2002).

A deformação plástica da aresta de corte também é considerada uma avaria onde a pressão e a alta temperatura são suas principais causas, pois provocam distorções no perfil do gume (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

De forma geral, todos os desgastes e avarias de ferramentas ao se elevarem podem ocasionar a quebra da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014). A Figura 14 ilustra os tipos de desgastes e avarias.

Figura 14 - Desgastes e Avarias



Fonte: Adaptado de Sandvik (apud Markus, 2001)

2.4.1.1 Principais Desgastes e avarias que ocorrem em operações de Fresamento

As avarias são os defeitos que ocorrem com maior frequência em operações de fresamento. Isto acontece devido ao fato de ele ser um processo caracterizado pelo corte

interrompido, pela geração de cavacos curtos, por oscilações térmicas, por oscilações de tensão sobre o gume e pela variação de carregamento durante o corte (STEMMER, 1995; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

As ferramentas de corte utilizadas em operações de fresamento tendem a apresentar defeitos como trincas, lascamentos e quebras, causados principalmente pelo corte interrompido, pois este gera variações das cargas térmicas e mecânicas durante o corte. As trincas ocorrem principalmente pelas flutuações de temperatura na ferramenta, pois causam variações de tensões no material da ferramenta em função da dilatação do mesmo. A quebra da aresta de corte pode ocorrer na entrada do gume na peça, início do ciclo ativo, como na saída da peça, início do ciclo inativo, devido ao choque mecânico existente nesses momentos do corte (CALLISTER, 2003)

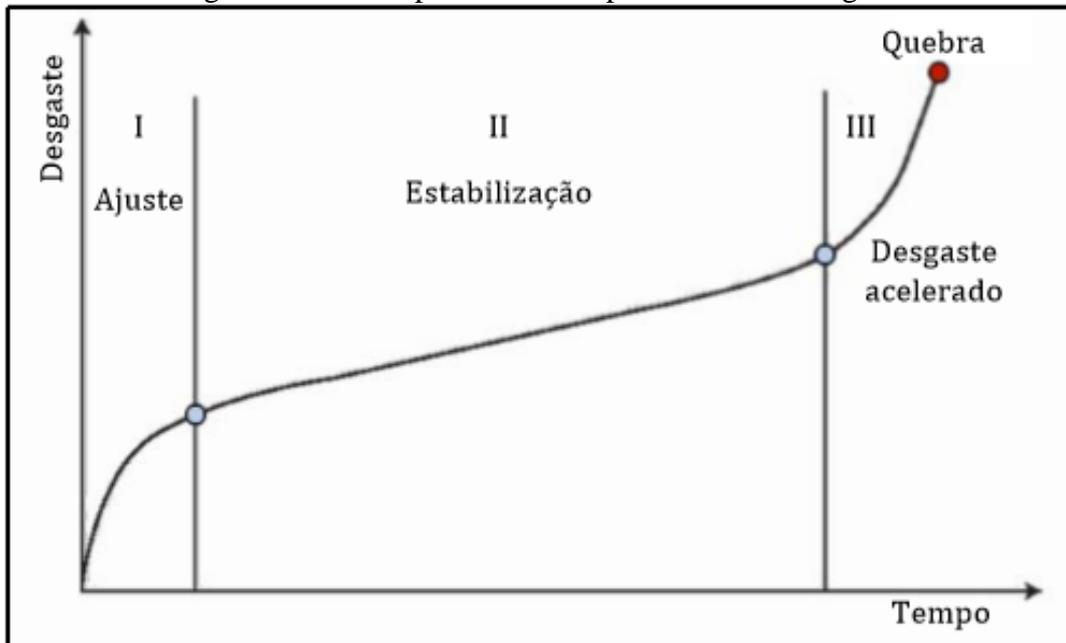
2.4.1.2 Vida da Ferramenta

Define-se a vida da ferramenta como sendo o tempo em que a mesma é empregada de forma efetiva sem que ela perca sua capacidade de corte, até que um critério de fim de vida previamente estabelecido seja atingido. Quando o critério de fim de vida for atingido, a ferramenta deve ser substituída ou reafiada, pois a utilização da ferramenta com um elevado nível de desgaste apresenta como consequência o aumento das forças de usinagem, acabamento superficial inadequado, elevação da temperatura e possivelmente a quebra da ferramenta (FERRARESI, 1977). Diversos critérios de fim de vida podem ser adotados, dentre eles podemos destacar a utilização de valores limites para os desgastes de flanco ocorrentes (VB e VB_{max}), ou para a rugosidade da superfície gerada, tempo efetivo de trabalho, percurso de corte e número de peças produzidas (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001).

As ferramentas de corte normalmente apresentam um comportamento de desgaste padrão quando utilizadas em condições de corte adequadas, isto pode ser observado na Figura 15. O desgaste apresenta a sua evolução em três estágios distintos. No estágio I, o desgaste acontece com uma taxa de crescimento maior natural da adequação ao sistema tribológico envolvido. Esta adequação é também chamada de ajuste de gume. No estágio II, o gume da ferramenta está adaptado ao processo e o desgaste ocorre de forma mais estável, pois a taxa de crescimento dele é constante. Por fim, no estágio III, o desgaste passa a aumentar de forma acelerada. Por isso, acontece a elevação das temperaturas e tensões na ferramenta que com a continuidade do corte pode vir a colapsar. O tempo é curto até que ocorra a quebra da ferramenta

no estágio III, logo, aconselha-se que este estágio seja evitado (MACHADO, ABRÃO e COELHO, 2015).

Figura 15 - Curva padrão do comportamento de desgaste



Fonte: Adaptado Machado, Abrão e Coelho (2015)

A largura do desgaste de flanco é o valor normalmente controlado em operações de fresamento com ferramentas de metal duro. Valores de VB na ordem de 0,8 a 1,5 mm devem ser evitados, pois é nessa faixa de valores que a quebra da cunha pode acontecer. No entanto, para operações de acabamento o critério de fim de vida deve ser determinado entorno de valores muito menores para não comprometer a qualidade superficial da peça. Contudo, na prática não se deve ultrapassar o valor de 0,2 mm para a largura VB_{max} (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

2.4.2 Qualidade superficial

O objetivo principal dos processos de usinagem é fabricar componentes funcionais. Então, a superfície e a subsuperfície dos componentes são de extrema importância para a sua funcionalidade e durabilidade (TOENSHOFF e DENKENA, 2013).

O termo qualidade superficial abrange a qualidade de acabamento de uma superfície e a integridade das camadas abaixo dela. Diversos fatores influenciam a qualidade final de uma

superfície, desses podemos citar: vibração, geração de calor, deformações plásticas, rupturas e tensões residuais (MACHADO, ABRÃO e COELHO, 2015).

Conforme Oliveira (2006), a qualidade superficial de uma peça apresenta dois fatores que devem ser definidos e controlados. As irregularidades geométricas da superfície topográfica representam o primeiro fator, enquanto que as alterações metalúrgicas da camada subsuperficial referem-se ao segundo fator. Os principais elementos que influenciam a qualidade superficial são: utilização de fluido lubrificante, geometria da ferramenta, microestrutura do material, velocidade de corte e velocidade de avanço.

As superfícies são geometricamente descritas pelo acabamento superficial enquanto que as propriedades do material, como vida em fadiga e resistência à corrosão, dizem respeito à integridade superficial (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

O acabamento superficial é determinado por vários fatores combinados os quais são divididos em rugosidade, ondulações e falhas. Sendo assim, a fabricação de uma determinada peça deve ser bem planejada para que ela possa atender com eficiência suas necessidades de aplicação superficial (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; FRACARO, 2017).

A rugosidade se refere a desvios pequenos, finamente espaçados, sendo presente em qualquer superfície. As ondulações são desvios com espaçamentos superiores aos da rugosidade, resultantes de irregularidades e erros geométricos causados por vibrações, deflexões da ferramenta e tratamentos térmicos. A falha representa interrupções na topografia da superfície. Devem-se evitar as ondulações e falhas, pois são tratadas como erros, diferente da rugosidade que não existe forma de evitar (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; FRACARO, 2017).

2.4.2.1 Textura

Em uma peça, os desvios repetitivos e randômicos da sua superfície real em comparação aos da sua superfície geométrica compõem a textura. Dessa forma, as características de uma superfície como ondulações, rugosidade, sulcos, ranhuras e falhas que ocorrem durante o processo de fabricação compõem a textura (BET, 1999).

Conforme Tabenkin (1999), a quantidade e direção de vales e picos que constituem uma superfície descrevem a textura, sendo assim a superfície é resumida em três elementos fundamentais: rugosidade, ondulação e forma. A medição dos componentes da textura é possível de ser realizada pelo uso de unidades distintas de comprimento, denominados de *cut-*

offs (comprimentos de amostragem). Cada componente pode ser dimensionado individualmente pela utilização do comprimento do *cut-off* junto com técnicas de filtros elétricos (NICOLA, 2008).

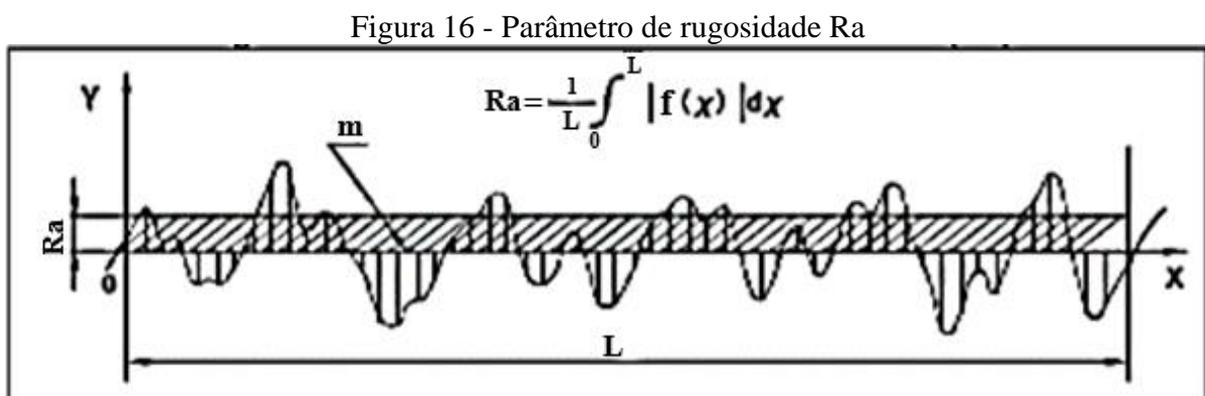
2.4.2.2 Rugosidade

No fresamento, o perfil do gume em combinação com a velocidade de corte e o avanço da ferramenta geram ondulações na superfície usinada. As diferenças nas alturas dessa ondulação será a rugosidade resultante do processo. Um gume de uma ferramenta de corte que apresenta arredondamento adequado à condição aplicada, sem ocorrência de defeitos ou desgaste de flanco acentuado, retorna em rugosidades menores. Velocidades de corte maiores também reduzem a rugosidade (MACHADO, ABRÃO e COELHO, 2015).

A medição da rugosidade é realizada pela utilização de um apalpador mecânico, o qual registra o perfil da superfície por meio de uma ponteira que percorre a superfície de amostragem (NICOLA, 2008; BET,1999; ZEILMANN et al.,2006.).

Conforme Oliveira (2006), sistemas de medição de rugosidade podem ser agrupados em três classes pelo critério da linha média. Essas classes são:

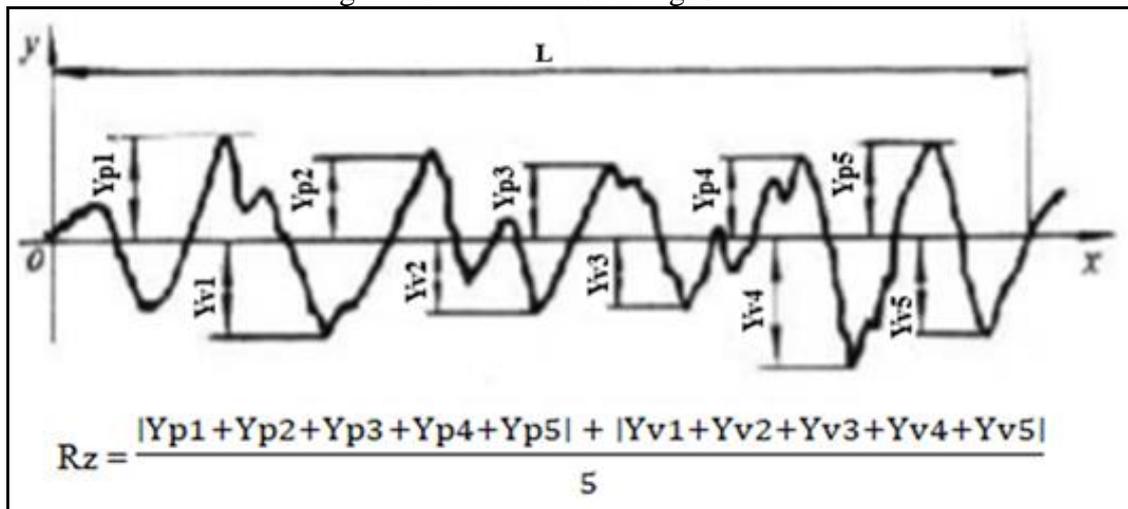
Rugosidade média (R_a), que é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média dentro do comprimento de amostragem. A Figura 16 demonstra o parâmetro de rugosidade R_a .



Fonte: Oliveira (2006)

R_z , que representa a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial, (Z_i), correspondendo à soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, dentro do comprimento de amostragem. A Figura 17 demonstra o parâmetro de rugosidade R_z .

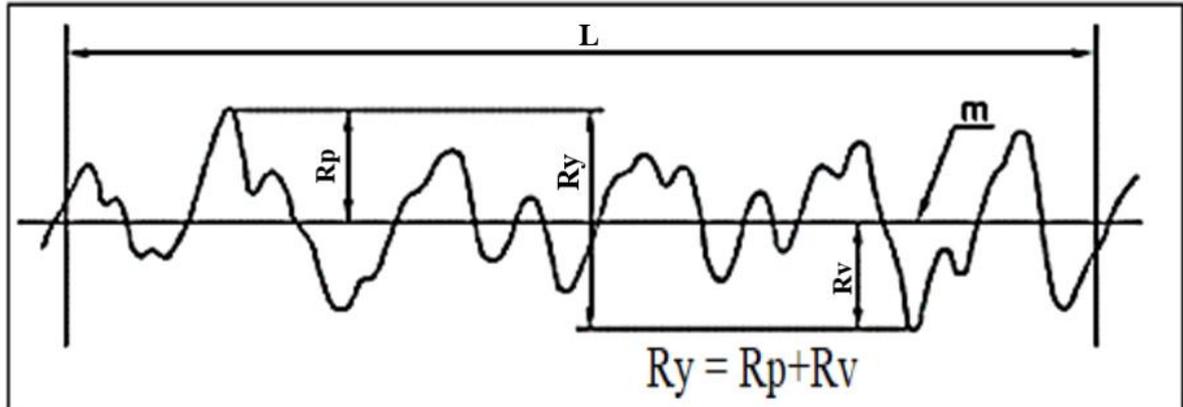
Figura 17 - Parâmetro de rugosidade Rz



Fonte: Oliveira (2006)

Ry ou Rmáx, que representa a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de amostragem. A Figura 18 demonstra o parâmetro de rugosidade Ry.

Figura 18 - Parâmetro de rugosidade Ry

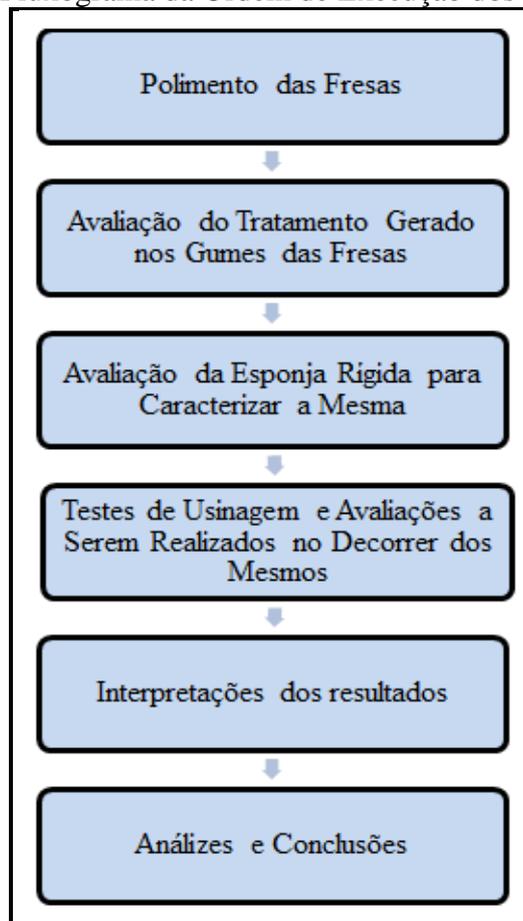


Fonte: Oliveira (2006)

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o planejamento, equipamentos, ferramentas e materiais utilizados para a realização dos testes experimentais, junto com os procedimentos aplicados para as análises dos resultados. Os experimentos que foram realizados neste trabalho seguem a ordem do fluxograma apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma da Ordem de Execução dos Experimentos



Fonte: O autor (2020)

3.1 Planejamento dos ensaios experimentais

O planejamento deste trabalho foi desenvolvido para a realização de ensaios com fresas de topo reto, em um corpo de prova com dimensões definidas. As fresas utilizadas para os ensaios foram submetidas a um tratamento de gume gerado pelo processo de polimento por escovamento, o qual ocorreu utilizando a mesma metodologia proposta por Buckell (2019). Porém, no trabalho de Buckell (2019) foram utilizadas esponjas abrasivas flexíveis para realizar

os polimentos nas fresas, já no presente trabalho foram utilizadas esponjas abrasivas rígidas. Devido ao surgimento de dificuldades para realizar os escovamentos das ferramentas utilizadas neste trabalho, foi necessário realizar alguns ajustes no processo de escovamento, estes ajustes estão detalhados no item 3.2 deste capítulo.

O polimento com esponjas rígidas foi realizado em 3 fresas de topo reto. Após a realização dos polimentos, para uma primeira avaliação, as fresas foram analisadas através de imagens obtidas por microscopia ótica utilizando um estereoscópio e um projetor de perfil, para verificar se o tratamento de gume gerado nas mesmas foi efetivo, gerando arredondamentos e se existem diferenças significativas entre os tratamentos gerados em cada gume das ferramentas avaliadas. Após a primeira avaliação das ferramentas, duas delas foram testadas em usinagem enquanto que a terceira foi preservada para uma análise mais detalhada das características do tratamento de gume gerado pelo polimento. Na análise mais detalhada do tratamento de gume gerado pelo polimento, foi verificado a qualidade superficial do gume, avaliando a textura e a rugosidade do mesmo. A topografia do gume também foi analisada para verificar se o mesmo se apresenta de forma homogênea, ou seja, sem a ocorrência de defeitos como rebarbas, microlascamentos e irregularidades.

Durante os testes de usinagem, foi avaliado o comportamento de desgaste das fresas para assim determinar a vida útil das mesmas e também a qualidade das superfícies geradas no corpo de prova, analisando a textura e a rugosidade.

O tratamento de gume gerado pelas esponjas rígidas foi comparado com o mesmo gerado por esponjas flexíveis, tendo como objetivo verificar qual tipo de esponja promove o tratamento de gume mais adequado, baseando-se nas recomendações da literatura pesquisada.

Os resultados obtidos nos testes de usinagem, realizados com fresas polidas por esponjas rígidas, foram comparados com os resultados obtidos por testes realizados com fresas polidas por esponjas flexíveis e também com os resultados obtidos em testes realizados com fresas sem tratamento.

Os resultados da usinagem com fresas polidas por esponjas flexíveis e com fresas sem preparação foram retirados do trabalho de Ost (2016), bem como as características avaliadas em seus gumes.

O Quadro 1 mostra que os ensaios aconteceram com três fresas que foram polidas com esponjas rígidas e também as variáveis que foram avaliadas nos gumes das fresas após o polimento e as variáveis que foram avaliadas quando as fresas passaram pelo teste de usinagem. A Fresa A10 e a Fresa A14 passaram por uma análise de tratamento de gume mais simples e foram testadas em usinagem, enquanto que a Fresa A17 passou por uma análise de tratamento

de gume mais detalhada, mas não foi testada em usinagem. Este mesmo quadro mostra que as variáveis avaliadas das fresas polidas por esponjas rígidas, tanto do polimento aplicado quanto dos testes de usinagem realizados, também foram avaliadas em fresas polidas por esponjas flexíveis e em fresas sem tratamento. No entanto, estes resultados já existem e foram retirados do trabalho de Ost (2016). Em função disto, não foram realizados ensaios com fresas polidas por esponjas flexíveis e nem com fresas sem tratamento.

Quadro 1 – Organização dos Ensaios

Tratamento	Ferramentas Testadas	Variáveis Avaliadas no Gume Após o Tratamento	Variáveis Avaliadas do Teste de Fresamento
Polimento com esponja rígida	Fresa A10	Ocorrência de Arredondamentos no Gume Topografia do gume	Desgaste de flanco e/ou lascamentos da fresa Rugosidade gerada
	Fresa A14		
	Fresa A17		
Polimento com esponja flexível	*	Rugosidade e Textura do Gume	Textura gerada
Sem tratamento	*		
*Resultados dos testes e variáveis avaliadas retirados do trabalho de Ost (2016).			

Fonte: O autor (2020)

3.1.1 Teste de fresamento

As fresas polidas pelo processo de escovamento com esponja rígida, foram testadas em ensaios de longa duração, sendo submetidas ao processo de usinagem por fresamento.

Para executar os testes, o corpo de prova (detalhado no item 3.4) foi fixado na mesa de um centro de usinagem através de uma morsa, enquanto que as fresas (detalhadas no tópico 3.3)

foram fixadas no eixo árvore do centro de usinagem, utilizando cone e pinça e com razão de comprimento por diâmetro (l/d) igual a 3.

Os parâmetros de usinagem utilizados para os testes de fresamento foram os mesmos de outros trabalhos anteriormente realizados por alunos da UCS, dentro desta mesma linha de pesquisa. Sendo assim, a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f_z) utilizados foram respectivamente de 180 m/min e 0,06 mm/gume, enquanto que a profundidade de corte (a_p) e a penetração de trabalho (a_e) foram respectivamente de 0,5 mm e 0,2 mm.

Durante os ensaios o corpo de prova foi usinado com estratégia de corte concordante, através de passes de 252 mm, por ser a medida de comprimento do mesmo.

A cada 5040 mm lineares usinados, que equivalem a 20 passes da ferramenta sobre o corpo de prova, o ensaio foi interrompido para análise e medição dos desgastes de flanco VB e VB_{max} , e também para monitorar os lascamentos e outros tipos de avarias e desgastes que poderiam ocorrer nas fresas. Este procedimento aconteceu até que as fresas testadas atingissem o desgaste de flanco $VB_{max} = 0,2$ mm ou até que ocorressem lascamentos nas mesmas. Os desgastes de flanco VB e VB_{max} foram determinados calculando a média dos valores destes desgastes ocorridos nos 4 gumes das fresas. Esta análise foi realizada com o objetivo de determinar a vida útil das fresas testadas, através do levantamento da curva do comportamento de desgaste das mesmas, a qual tem seu comportamento padrão demonstrado na Figura 15 do capítulo 2.

Para que os desgastes das fresas fossem gerados pelos parâmetros de usinagem em conjunto com a condição do gume tratado e pelas propriedades dos materiais, os fresamentos ocorreram sem a utilização de fluídos lubrificantes. Além disto, foram utilizadas fresas de metal duro sem revestimento e os parâmetros de usinagem foram mantidos constantes em todos os testes.

3.2 Polimento por escovamento

O processo de polimento por escovamento ocorreu nas dependências da UCS, utilizando esponjas abrasivas rígidas. Estas esponjas são fornecidas como placas laminadas Scotch-Brite™ 3M de código EXL 2A-MED, formadas por uma manta não tecida prensada em camadas, as quais são constituídas por filamentos de nylon dispostos como um emaranhado que apresentam abrasivos aderidos por uma resina a prova d'água. O abrasivo que constitui esta esponja é o óxido de alumínio de grau médio. Dentro de uma escala de densidades que varia de

2 a 8, esta esponja apresenta densidade 2, sendo muito suave e indicada para aplicações que requerem conformabilidade da mesma (3M, 2020).

Com o objetivo de obter informações mais precisas sobre as características das esponjas rígidas, a mesma foi analisada por meio de imagens com 50X de magnificação realizadas pelo microscópio ótico Nikon, modelo Epiphot 200. As esponjas flexíveis, por terem sido utilizadas em outros trabalhos, já apresentam resultados da sua caracterização. Esses resultados foram utilizados neste trabalho para comparar as características dos dois tipos de esponjas abrasivas utilizadas e assim, entender melhor como ocorre a remoção de material realizada pelo escovamento promovido com estas esponjas.

Para executar o polimento das fresas, foram recortados e furados em seu centro, com uma serra copo, discos de aproximadamente 25,5 mm de diâmetro das esponjas. Após, estes foram fixados em um suporte de aço, através de um parafuso M6, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Esponjas abrasivas



Fonte: Adaptado de 3M e Buckell (2019)

Em uma miniretífica pneumática, com o uso de uma pinça, foi fixado o suporte de aço. Esta miniretífica é da marca Campbell Hausfeld, modelo TL102002, e pode operar a 25000 rpm quando trabalha com 6 bares de pressão. Utilizando uma morsa e um dispositivo que possibilita a inclinação em dois eixos, a miniretífica foi fixada na mesa de trabalho de um centro de usinagem (o mesmo comentado no item 3.5). A Figura 21 mostra o dispositivo utilizado para promover a inclinação na miniretífica.

Figura 21 - Miniretífica e dispositivo utilizado para realizar os polimentos



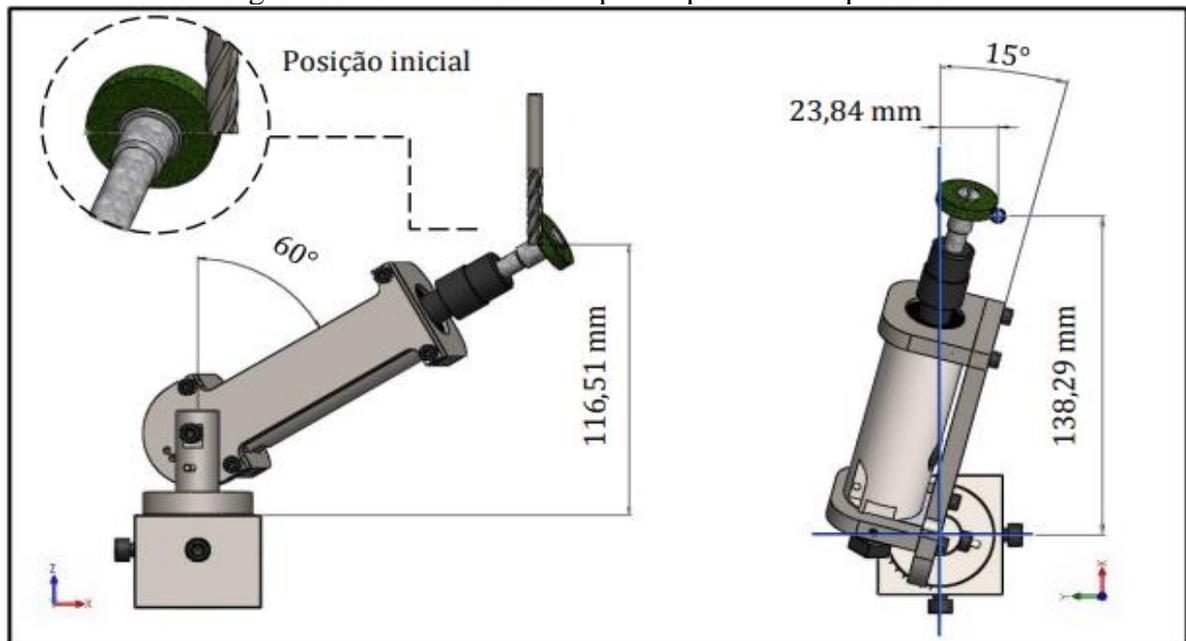
Fonte: Buckell (2019)

No eixo árvore do centro de usinagem, as fresas foram fixadas através de cone e pinça com o auxílio de um eixo porta pinça, o qual foi utilizado para aumentar a distância entre o eixo árvore da máquina e a miniretífica durante os escovamentos das fresas, com o objetivo de evitar colisões entre os mesmos. A inclinação entre a face do disco abrasivo e o eixo de rotação das fresas foi ajustado em um ângulo de 30° , por ser o ângulo de hélice das fresas. Já, a inclinação entre a face do disco abrasivo e o eixo de penetração radial de trabalho foi de 15° . A Figura 22 demonstra os posicionamentos entre disco abrasivo e fresa que foram utilizados para realizar os escovamentos no trabalho de Buckell (2019) e que em princípio seriam utilizados para realizar os escovamentos deste trabalho, porém como as esponjas rígidas utilizadas neste trabalho não se moldam sobre a geometria do gume da ferramenta com a mesma facilidade que as esponjas flexíveis utilizadas no trabalho de Buckell (2019), quando ocorria o contato entre o disco da esponja rígida com a fresa o mesmo parava de rotacionar, mostrando que a miniretífica

utilizada não atingia o torque necessário para realizar os escovamentos dos gumes das ferramentas com a profundidade de contato radial imposta pelos posicionamentos da Figura 22, em função disto foi necessário realizar ajustes no processo de escovamento para conseguir realizá-lo. Sendo assim, a cota de 23,84 mm mostrada na Figura 22 foi alterada para 25,5 mm e a rotação do disco antes de entrar em contato com a ferramenta foi ajustada em 7000 rpm, diferente da rotação utilizada por Buckell (2019), a qual foi de 6000 rpm.

A rotação do disco da esponja foi ajustada aproximadamente em 7000 rpm, antes que o disco da esponja entrasse em contato com a ferramenta, porém quando ocorria o contato entre o disco da esponja e a ferramenta a rotação do disco reduzia para aproximadamente 5400 rpm. A rotação dos discos foi medida pela utilização de um tacômetro à laser da marca Extech Instruments, modelo 461920, e através do controle de vazão do conjunto preparador de ar localizado junto ao centro de usinagem no laboratório, foram feitos os ajustes.

Figura 22 - Posicionamentos para o processo de polimento



Fonte: Buckell (2019)

A base do dispositivo de fixação da miniretífica foi utilizada como referência para gerar as coordenadas de posição da fresa em relação ao disco da esponja e executar os posicionamentos no centro de usinagem. A altura entre a base do dispositivo e a face da fresa alinha a quina da mesma com o centro do disco da esponja, assim fornecendo a posição inicial para realizar o escovamento.

Para que as fresas polidas, posteriormente, pudessem ser reafiadas e utilizadas em outros ensaios, o deslocamento axial realizado pelas fresas sobre a esponja foi de 3,75 mm partindo

do topo das mesmas. Para cada gume foram realizadas 32 repetições desse deslocamento, assim o tempo aproximado de polimento de cada gume foi de 1 minuto.

Em função de o gume das fresas se apresentarem de forma helicoidal, foi utilizado um comando de rosqueamento na programação do centro de usinagem, para dessa forma fazer com que o disco da esponja percorresse corretamente o gume da fresa durante o escovamento.

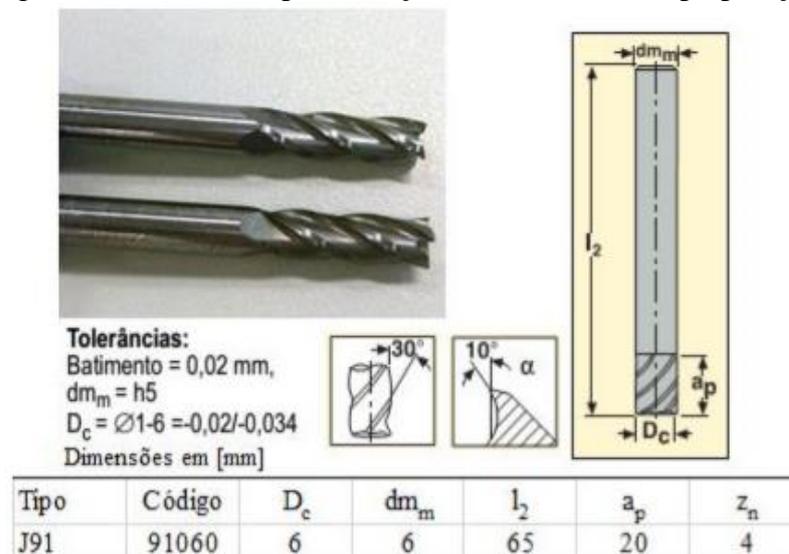
No programa de rosqueamento foi utilizada uma rotação de rosca de 7 rpm em conjunto com um avanço linear relativo ao passo da rosca, que neste caso é o passo da hélice da ferramenta o qual tem um valor de 32,65 mm.

Todos os posicionamentos e parâmetros utilizados para realizar os escovamentos dos gumes das ferramentas, fizeram que a direção do escovamento ocorresse de forma paralela aos gumes das fresas.

3.3 Ferramentas de corte utilizadas

As fresas que foram utilizadas nos ensaios tem diâmetro de corte e diâmetro da haste de 6 mm, comprimento total (l_2) de 65 mm e comprimento de corte (l_1) de 20 mm. Apresentam corpo inteiriço de metal duro, sem revestimento e com gumes que não passaram por nenhum tipo de tratamento, ou seja, os gumes se apresentam afiados por processo de retífica. Além disso, as fresas não apresentam raio de quina, possuem 4 gumes de corte, com ângulo de hélice de 30° e fazem parte da linha Jabro fornecida pela Seco Tools. A Figura 23 mostra os detalhes das fresas utilizadas.

Figura 23 - Fresa de topo inteiriça de metal duro sem preparação



Fonte: Adaptado de Seco Tools, 2008

3.4 Corpo de prova

O corpo de prova que foi utilizado nos ensaios apresenta as seguintes dimensões: 252 mm de comprimento, 80 mm de largura e espessura que varia entre 50 e 55 mm, em função de ensaios anteriormente executados com o mesmo. Sendo fabricados do aço AISI P20, tratado termicamente com dureza média de 35-37 HRC. Para promover um melhor posicionamento e alinhamento na fixação no centro de usinagem, os corpos de prova apresentam suas superfícies retificadas. A composição química do material do corpo de prova é apresentada na Tabela 1, com valores para a média de três medições obtidas através da análise de composição química.

Tabela 1 – Composição química do 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)

3.5 Variáveis avaliadas e Equipamentos utilizados

Os testes de usinagem apresentam, como variáveis de saída, o desgaste ocorrido nas fresas para assim determinar a vida útil das mesmas e também a qualidade das superfícies geradas no corpo de prova, analisando a textura e a rugosidade.

As rugosidades foram obtidas através de um rugosímetro portátil da marca Mitutoyo, modelo SJ-301, possuindo resolução de 0,01 μm , raio de ponta do apalpador de diamante de 5 μm e coincidência de 90°. Com o rugosímetro foram realizadas 5 medições de rugosidade em diferentes regiões das superfícies geradas no corpo de prova por cada ferramenta, estas medições ocorreram para início e fim de vida de cada ferramenta, utilizando o *cut-off* de 0,8 mm para 5 intervalos de medição e os critérios R_a , R_z e $R_{z\text{max}}$. As texturas foram avaliadas através de imagens obtidas pelo estereoscópio trinocular de medição universal Entex, modelo TNE-10B.

Nos testes de usinagem, através de imagens que foram obtidas por microscopia ótica com o uso do mesmo estereoscópio utilizado para avaliar as texturas geradas no corpo de prova e também com o uso de um projetor de perfil da marca Hexagon, modelo OLM 3020, com capacidade de resolução de 1 micrômetro, capacidade de magnificação de 30X a 180X, dotado de uma câmera CCD de alta resolução, foram feitas as análises dos desgastes de flanco VB e

VB_{max} e também foi monitorado os lascamentos e outros tipos de avarias e desgastes que poderiam vir a ocorrer nas fresas. Para medir os desgastes de flanco VB e VB_{max} , nas imagens obtidas no estereoscópio, foi utilizado o *software* ScopePhoto. No projetor de perfil, para aquisição das imagens e medição dos desgastes de flanco VB e VB_{max} das ferramentas, foi utilizado o *software* VMS 3.1, o qual é disponibilizado junto com o projetor de perfil.

Os polimentos das fresas e os testes de usinagem foram realizados em um centro de usinagem da marca Hartford, modelo LG-500, de potência e rotação máxima respectivos de 10 kW e 10000 rpm. Esta máquina situa-se no bloco D da Universidade de Caxias do Sul. Após a realização dos polimentos, para uma primeira avaliação, as fresas foram analisadas através de imagens obtidas pelo mesmo estereoscópio utilizado para avaliar as texturas geradas no corpo de prova, a fim de verificar se os polimentos realmente geraram um tratamento no gume das fresas.

Após a primeira avaliação, uma das fresas polidas foi preservada para uma análise mais detalhada. Nesta análise mais detalhada, o tratamento foi avaliado através de medições de rugosidade realizadas no flanco, próximo ao gume principal. Essas medições de rugosidade ocorreram com o mesmo rugosímetro que foi utilizado para medir a rugosidade das superfícies geradas no corpo de prova e também foram utilizados os critérios R_a , R_z e Rz_{max} , realizando 3 medições na região polida de cada gume. No entanto, para medir a rugosidade dos gumes foi utilizado um *cut-off* de 0,25 mm com 5 intervalos de medição, pois mesmo que os valores da rugosidade R_a sejam maiores que a faixa normal de trabalho, o comprimento total de medição impossibilita realizar a medição com um *cut-off* superior, pois a curvatura do perfil da hélice do gume da ferramenta é superior à máxima curvatura permitida pelo rugosímetro. A Figura 24 mostra a região em que foi realizada a medição da rugosidade no gume e a forma como foi medida.

Figura 24 - Região e forma de medição da rugosidade



Fonte: Adaptado de Silva e Zanella (2018)

Assim sendo, os gumes tratados por esponjas rígidas foram comparados com gumes tratados por esponjas flexíveis e também com os gumes provenientes do processo de afiação por retificação, característicos das ferramentas originas de fábrica. Desta maneira, foi verificado qual tipo de esponja promove os melhores resultados, baseando-se nas recomendações encontradas na literatura pesquisada.

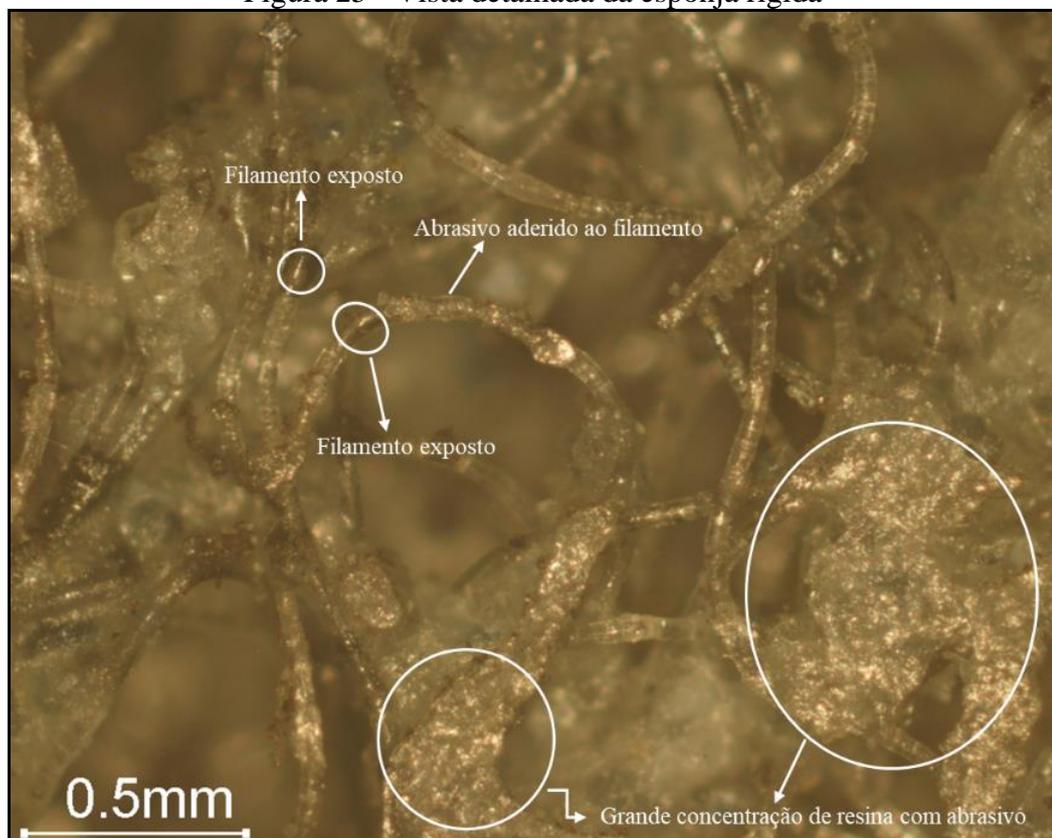
4 RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado e discutido o tratamento de gume gerado nas fresas pelo escovamento realizado com esponja rígida e com esponja flexível, os mesmos foram comparados entre si e com as características do gume de uma ferramenta original de fábrica (OF), ou seja, afiada por processo de retífica. É avaliado também a vida útil das fresas tratadas com esponja rígida que foi comparada com a vida útil de fresas tratadas por esponjas flexíveis e de fresas sem tratamento. Por fim, a qualidade superficial obtida no corpo de prova pelas fresas tratadas por esponja rígida também foi avaliada e comparada com os resultados de qualidade superficial obtidos por fresas polidas por esponjas flexíveis e por fresas sem tratamento.

4.1 Caracterização das Esponjas

A Figura 25 apresenta de forma detalhada as características da esponja rígida, permitindo observar sua construção e geometria.

Figura 25 - Vista detalhada da esponja rígida

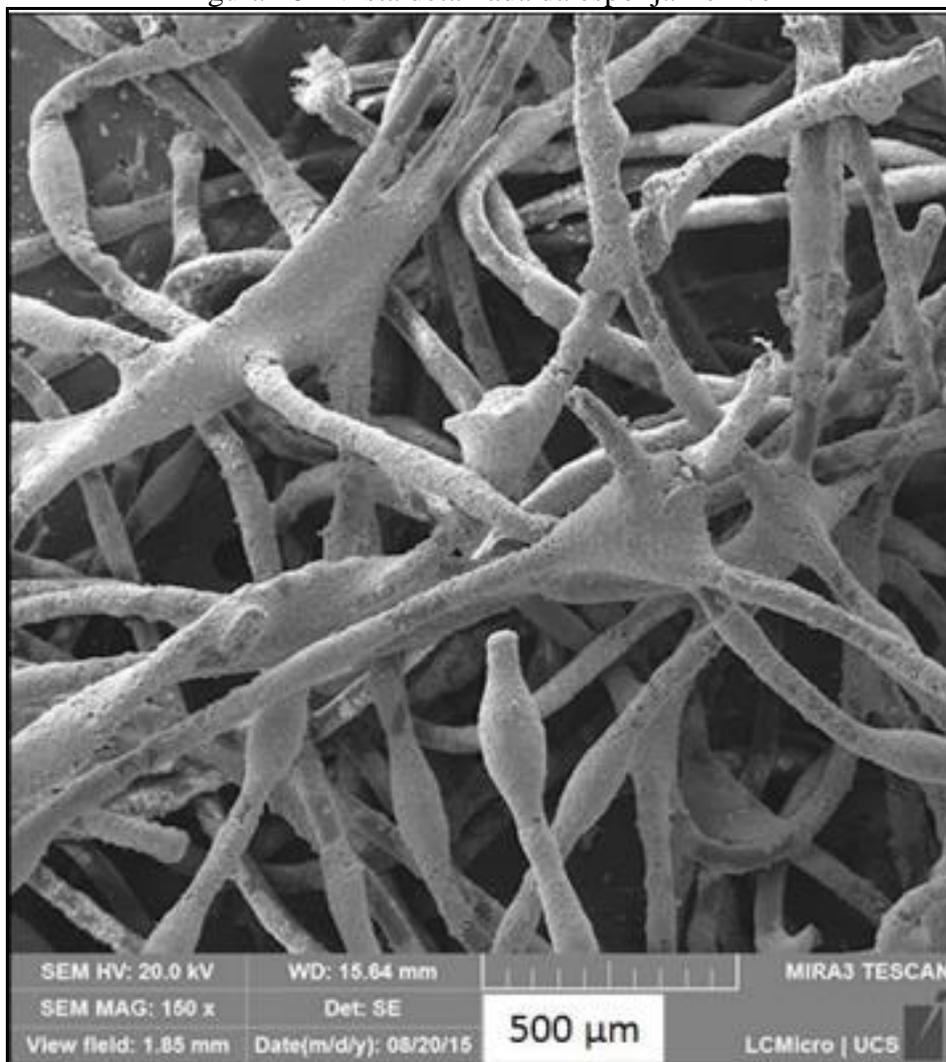


Fonte: o autor (2020)

A esponja rígida é constituída de uma malha de fios dispostos como um emaranhado, os quais apresentam abrasivos aderidos. Nota-se também que enquanto em algumas regiões os fios estão expostos, ou seja, sem abrasivos aderidos, em outras existe um acúmulo de resina com abrasivo. Este acúmulo, em algumas regiões da esponja rígida, pode ser uma possível explicação da característica de rigidez da esponja, já que o mesmo não ocorre com a esponja flexível.

Já a Figura 26 apresenta de forma detalhada as características da esponja flexível, permitindo observar sua construção e geometria.

Figura 26 - Vista detalhada da esponja flexível



Fonte: Adaptado de Ost (2016)

Conforme Ost (2016), a esponja flexível é formada, primariamente, por uma malha de fios que tem 50 μm de diâmetro aproximadamente, estes fios estão dispostos como um emaranhado e apresentam abrasivos aderidos, da mesma forma que para a esponja rígida.

4.2 Caracterização das Fresas Após o Escovamento

A caracterização das ferramentas é necessária para verificar se o escovamento com esponja rígida foi efetivo em promover um tratamento nos gumes das mesmas, gerando algum tipo de arredondamento sem causar falhas que possam influenciar negativamente no desempenho em usinagem das ferramentas. Esta análise também permite comparar a ferramenta tratada com a ferramenta original de fábrica (OF) e detectar as possíveis diferenças, pois a ferramenta original de fábrica é a referência de comparação para verificar se o processo de escovamento realizou uma preparação nos gumes das ferramentas sem causar danos aos mesmos.

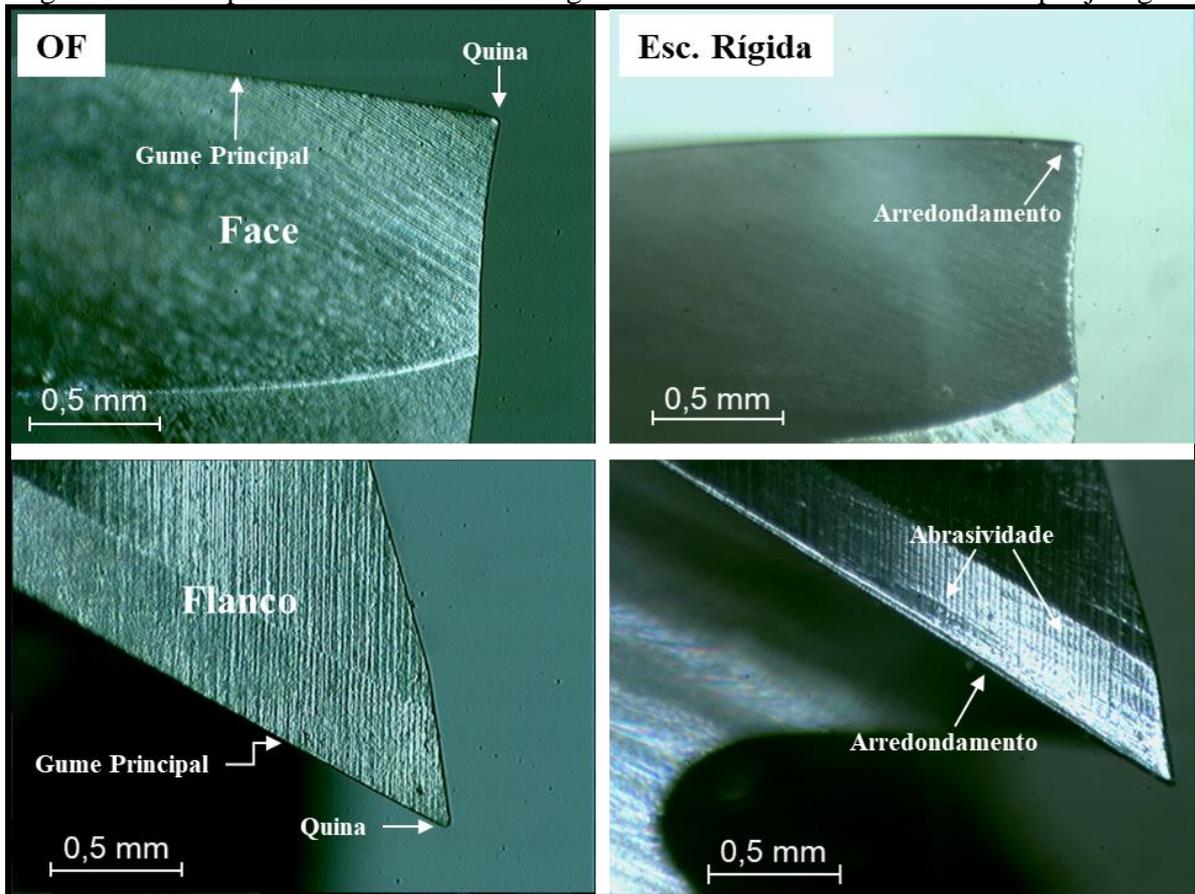
A Figura 27 contém imagens da face e do flanco dos gumes da ferramenta na condição original de fábrica e também dos gumes da ferramenta escovada por esponja rígida. Estas imagens foram obtidas por microscopia ótica utilizando o estereoscópio especificado no item 3.5 deste trabalho.

As ferramentas originais de fábrica possuem arestas de corte bem definidas e ao analisar as texturas das superfícies da face e do flanco dos gumes, verifica-se que as marcas da passagem do rebolo durante o processo de afiação por retificação são bem definidas e evidentes em uma mesma direção. No entanto, as ferramentas escovadas com esponja rígida apresentam arredondamentos nos gumes principais que estão voltados tanto para a face quanto para o flanco do gume. No caso da face, o arredondamento é mais pronunciado próximo à quina da ferramenta.

Ao analisar as texturas das superfícies da face e do flanco dos gumes das ferramentas escovadas com esponja rígida, também se nota que as marcas da passagem do rebolo, geradas durante o processo de afiação por retificação, são bem definidas. Porém, na região do flanco próximo ao gume principal, estas marcas são menos evidentes que as marcas das ferramentas originais de fábrica, uma explicação para isto é que o escovamento gerou uma suavização da superfície dessa região do gume.

Os gumes das ferramentas não apresentam falhas ou defeitos aparentes, como os microlascamentos, que poderiam ter sido causados pelo escovamento, contudo a região do flanco dos gumes apresenta marcas de abrasividade, as quais tem a mesma direção e orientação do gume principal. Este fato levanta a hipótese de que estas marcas foram geradas pelo escovamento, já que o mesmo ocorreu com a esponja inclinada com um ângulo de 30 graus, que é o ângulo de hélice dos gumes das fresas.

Figura 27 - Comparativo entre as fresas originais de fábrica e escovadas com esponja rígida



Fonte: Ost (2016) e o autor (2020)

Além da caracterização pelas imagens obtidas por microscopia ótica no estereoscópio, foram realizadas medições de rugosidade dos gumes principais de uma das três ferramentas escovadas por esponja rígida, o procedimento para a medição das rugosidades está detalhado no item 3.5 deste trabalho. Já para a medição das rugosidades dos gumes das ferramentas originais de fábrica e das ferramentas escovadas por esponja flexível foi utilizado um equipamento ótico de foco infinito. Porém, estes resultados foram retirados do trabalho de Ost (2016) como já comentado no capítulo 3 deste trabalho. A Tabela 2 mostra os valores de rugosidade medidos nos gumes principais da ferramenta escovada com esponja rígida, escovada com esponja flexível e original de fábrica.

Avaliando as medidas de rugosidade registradas na Tabela 2, verifica-se que as ferramentas escovadas com esponja rígida apresentam os maiores valores para todos os parâmetros de rugosidades medidos, seguidas das ferramentas escovadas com esponja flexível, as quais apresentam o segundo maior valor de rugosidade para todos os parâmetros verificados. Por fim, apresentando os menores valores de rugosidade para todos os parâmetros medidos estão as ferramentas originais de fábrica.

Os valores de rugosidades mostrados na tabela 2 para as ferramentas escovadas com esponja rígida, foram obtidos a partir do cálculo da média de 12 medições de rugosidade, sendo realizadas 3 medições por gume.

Estes resultados confirmam que as marcas de abrasividade mostradas na Figura 27 foram geradas pelo escovamento, já que as ferramentas escovadas apresentam rugosidades bastante superiores em relação as ferramentas originais de fábrica, principalmente as ferramentas escovadas por esponja rígida.

Os altos valores de rugosidade nos gumes das ferramentas escovadas podem ser consequência da cinemática do processo de escovamento e também do grau de abrasividade das esponjas utilizadas, que no caso a esponja rígida demonstrou ser a mais abrasiva, já que os processos de escovamentos utilizados, tanto com a esponja rígida quanto com a esponja flexível, são semelhantes. Outra análise que pode ser feita, apenas entre as ferramentas escovadas, é que a rugosidade Rz gerada pelo escovamento com esponja rígida é superior a 3 vezes a rugosidade Rz gerada pela esponja flexível, mostrando que no escovamento com esponja rígida a ocorrência de vales e/ou picos de valores elevados é significativamente maior.

Outra explicação para que as ferramentas escovadas com esponja rígida tenham apresentado os maiores valores de rugosidades dentre as 3 condições avaliadas é que devido a característica de rigidez, gerou uma maior pressão de contato sobre os gumes das ferramentas, quando comparada com a esponja flexível.

No trabalho de Overholser, Stango e Fournelle (2003), em testes com esponjas abrasivas dotadas de filamentos de nylon, foi verificado que a qualidade da superfície escovada é influenciada por fatores como granulometria do abrasivo, espaçamentos entre partículas abrasivas, profundidade de penetração, velocidade rotacional da escova e pressão da escova sobre a superfície. Isto mostra a grande complexidade do processo de escovamento e como o mesmo pode ser imprevisível.

Tabela 2 – Rugosidades medidas nos gumes das fresas

Rugosidades do Flanco dos Gumes Principais			
Parâmetro	Esc. Rígida	Esc. Flexível	OF
Ra	0,55	0,4	0,17
Rz máx	4,56	2,73	0,85
Rz	3,2	1,03	0,38

Comprimento de *Cut-off* = 0,25 mm

Fonte: Ost (2016) e o autor (2020)

4.3 Vida útil das fresas

Para avaliar a influência do escovamento com esponja rígida na vida útil das fresas, foi realizado o teste de usinagem com duas ferramentas escovadas. Durante os testes foi acompanhado e analisado o comportamento de desgaste e os tipos de desgastes ocorridos nos gumes das fresas. Os resultados dos testes de usinagem, realizados com as fresas escovadas com esponja rígida, foram comparados com os resultados de testes de usinagem realizados com fresas escovadas com esponja flexível e com os resultados de testes de usinagem realizados com fresas originais de fábrica.

4.3.1 Comportamento de desgaste

O Gráfico 1 contém as curvas do comportamento de desgaste. Em preto, está representada a média dos desgastes em milímetros, em função do comprimento usinado em metros para duas fresas na condição original de fábrica. Em verde, ocorre o mesmo, porém para as fresas que foram escovadas com esponja flexível. Por fim em azul, para fresas que foram escovadas com esponja rígida. A linha tracejada em vermelho representa o fim de vida pré-determinado para um desgaste de flanco $VB_{\max} = 0,2$ mm.

Analisando o Gráfico 1, verifica-se que para o início das 3 curvas o desgaste apresenta uma taxa de crescimento maior, ou seja, o desgaste é mais acentuado para um comprimento usinado pequeno, estando de acordo com o Estágio I de desgaste mostrado na Figura 15 do capítulo 2 deste trabalho. Este estágio representa a região de ajuste de gume, a qual ocorre devido a adaptação dos gumes da ferramenta ao sistema tribológico envolvido no corte. No Estágio I de desgaste se nota que as ferramentas escovadas com esponja flexível e as ferramentas originais de fábrica apresentam comportamento similar, já as ferramentas escovadas com esponja rígida chegam ao fim do Estágio I com um valor de desgaste menor que as demais. Porém, quando entra no Estágio II de desgaste, o qual representa a região de estabilidade de desgaste, conforme a Figura 15 do capítulo 2, as ferramentas escovadas com esponja rígida apresentam uma taxa de crescimento de desgaste superior em relação a taxa de crescimento de desgaste das ferramentas escovadas por esponja flexível e originais de fábrica. Ainda dentro da região de estabilidade, próximo ao desgaste de flanco $VB_{\max} = 0,15$ mm, existe uma inflexão apresentada pelas curvas, mostrando que após essa inflexão a curva das ferramentas escovadas com esponja rígida apresentou um aumento significativo na taxa de crescimento do desgaste. Uma hipótese para explicar este fato é que os elevados valores de

rugosidades dos gumes das ferramentas escovadas com esponja rígida, quando comparados com os valores de rugosidades apresentados pelos gumes das outras condições avaliadas, somado ao desgaste mais acentuado nesse momento da vida das ferramentas, pode ter elevado de forma significativa a temperatura do corte, fazendo que o material da ferramenta tivesse sua dureza reduzida, conseqüentemente reduzindo sua resistência ao desgaste e aumentando a taxa de crescimento do mesmo. Devido a estes fatores, as ferramentas escovadas com esponja rígida atingem o fim de vida $VB_{max} = 0,2$ mm antes das demais ferramentas, seguido pelas ferramentas escovadas com esponja flexível e por fim as ferramentas originais de fábrica, as quais apresentam a maior vida útil dentre as 3 condições avaliadas. Para as fresas escovadas com esponja rígida o comprimento usinado médio foi de 29,67 metros, já para as fresas escovadas com esponja flexível a média aconteceu em 35,24 metros e para as fresas originais de fábrica a média ocorreu em 37,86 metros. As 3 condições avaliadas atingem o fim de vida ainda dentro do Estágio II, pois o fim de vida de $VB_{max} = 0,2$ mm é considerado conservador, sendo sugerido para operações de acabamento, com isso os desgastes não chegam até o Estágio III (desgaste catastrófico). Em comparação com as fresas originais de fábrica, as fresas escovadas com esponja rígida apresentam uma redução da vida útil de 21,63 %, enquanto que as fresas escovadas com esponja flexível apresentam uma redução de 6,92 %.

A redução da vida útil das ferramentas escovadas pode ser explicada pelo fato de estas terem apresentado valores de rugosidades, no flanco dos gumes principais, superiores aos valores medidos nos gumes das ferramentas originais de fábrica, pois o aumento da rugosidade aumenta o atrito entre o flanco do gume da ferramenta e a superfície usinada, este fato pode elevar as forças de usinagem promovendo uma maior instabilidade no corte, intensificando os desgastes. O aumento do atrito causado pela maior rugosidade dos gumes das ferramentas escovadas também pode aumentar a temperatura de usinagem, porque o atrito gera calor e por consequência eleva a temperatura do corte, reduzindo a resistência ao desgaste da ferramenta e com isso reduzindo também a sua vida útil, pois o aumento da temperatura faz com que o material do qual a ferramenta é fabricada perca dureza. Este fato intensifica o mecanismo de abrasão, que é o principal causador do desgaste de flanco, o qual foi utilizado como critério para determinar o fim de vida das ferramentas testadas.

Segundo Klocke e König (2008) e Stemmer (1995), a abrasão mecânica ocorre pelo atrito exercido por partículas duras presentes na superfície usinada da peça ou no cavaco, sendo agravada pelas altas pressões e temperaturas existentes entre a peça e a ferramenta durante o corte.

Os valores dos parâmetros de rugosidade dos gumes das fresas escovadas com esponja rígida foram significativamente superiores as demais condições avaliadas. Provavelmente por esse motivo, a vida útil das mesmas foi bastante inferior as demais condições, pois como mencionado anteriormente, o aumento da rugosidade aumenta o atrito, que por consequência intensifica o mecanismo de abrasão, que é o principal causador do desgaste de flanco.

No entanto, os elevados valores de rugosidades dos gumes das ferramentas escovadas com esponja rígida, prejudicaram o desempenho das mesmas em usinagem, pois as marcas de abrasividade geradas pelos escovamentos, as quais foram as responsáveis por elevar os valores das rugosidades, estão dispostas de forma paralela aos gumes das fresas, atuando como bloqueios para o deslizamento do flanco dos gumes das ferramentas sobre a superfície usinada. As direções das marcas de abrasividade foram geradas, provavelmente, devido a direção de atuação dos escovamentos. Porém, se as marcas de abrasividade geradas pelo processo de escovamento apresentassem direção perpendicular ao eixo de rotação das fresas, possivelmente, mesmo que os valores das rugosidades dos gumes fossem elevados, os mesmos não afetariam negativamente o desempenho das ferramentas, já que dessa forma as marcas de abrasividade apresentariam a mesma direção do vetor da velocidade de corte durante a usinagem, favorecendo o deslizamento do flanco dos gumes das ferramentas sobre a superfície usinada.

As marcas de abrasividade poderiam se apresentar de forma perpendicular ao eixo de rotação das fresas, se o escovamento fosse realizado de maneira que o eixo de rotação do disco da esponja fosse posicionado de forma paralela ao eixo de rotação das fresas.

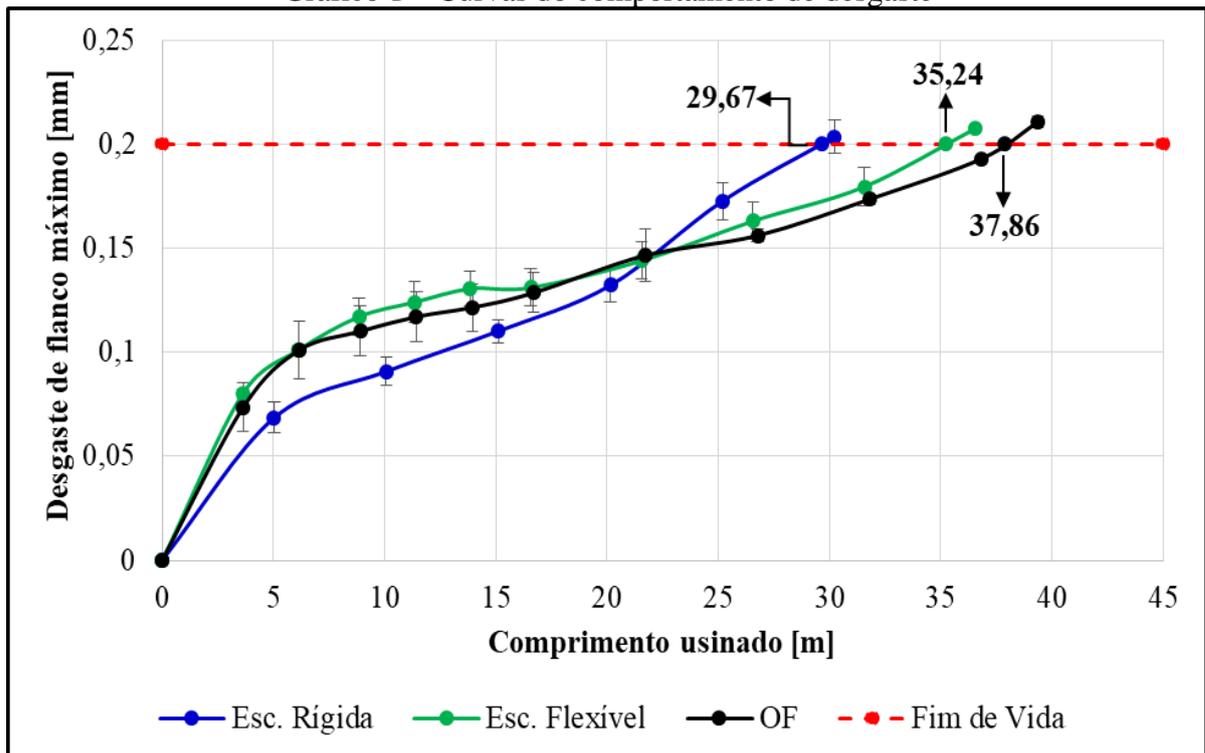
Resultados apresentados por Peterson et al. (1985), relacionados a topografia de superfícies, mostraram que a orientação das asperezas de uma superfície tem forte influência no desgaste por deslizamento, pois quando a orientação das asperezas atuou de forma paralela a direção do deslizamento o desgaste ocorrido foi menor, já quando a orientação das asperezas atuou de forma perpendicular a direção do deslizamento o desgaste ocorrido foi maior. Estes resultados foram relacionados à restrição do movimento causada pela orientação perpendicular das asperezas em relação a direção de deslizamento.

No trabalho de Ost (2016), o autor comparou o desempenho, em usinagem, de 3 condições de gume de fresas: fresa original de fábrica (OF), fresa polida por esponja abrasiva (POL) e fresas tratadas em acabamento por arraste (AA). Na usinagem a seco, as condições OF e AA apresentaram desempenhos bastante próximos, sendo ambos superiores ao desempenho apresentado pela condição POL. O autor relacionou os resultados com as rugosidades apresentadas pelos gumes das fresas, que no caso as fresas da condição POL apresentaram os

maiores valores de rugosidades em seus gumes dentre as 3 condições avaliadas, e consequentemente apresentaram as menores vidas úteis.

No Gráfico 1, a curva em azul foi gerada com dados obtidos pelos experimentos deste trabalho, já as curvas em preto e verde foram geradas com dados obtidos nos experimentos do trabalho de Ost (2016).

Gráfico 1 – Curvas do comportamento de desgaste



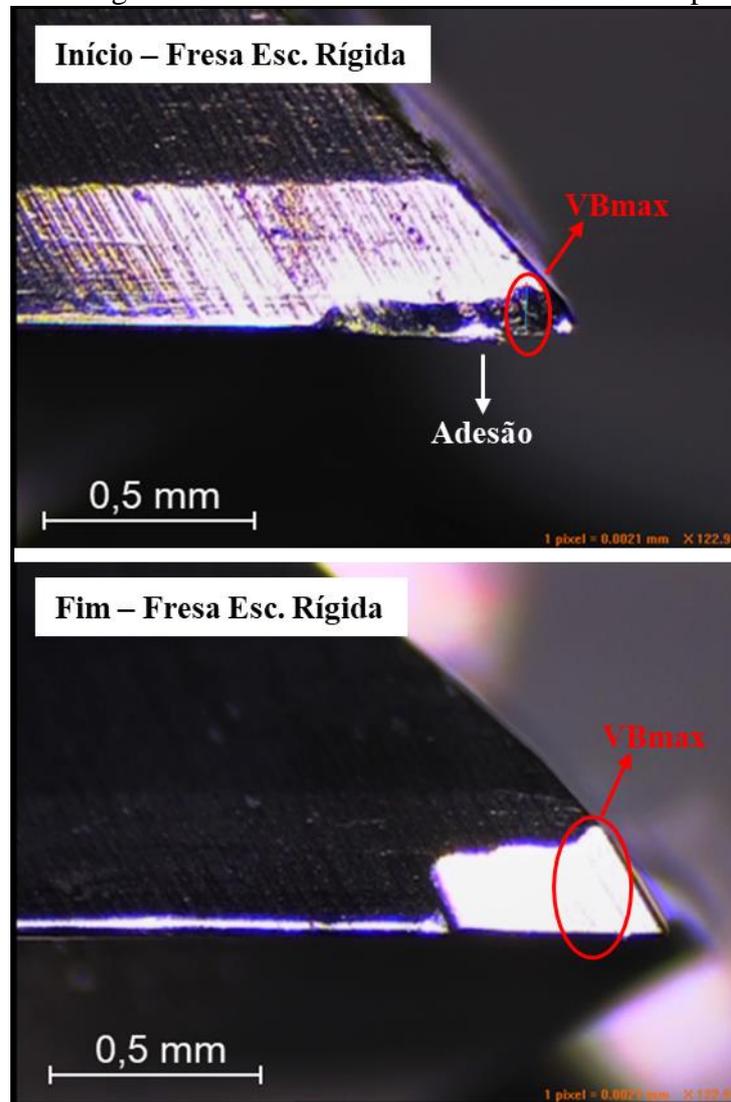
Fonte: Curvas em preto e verde, Ost (2016) e curva em azul, o autor (2020)

4.3.2 Caracterização dos tipos de desgastes e dos mecanismos de desgaste

Para a análise dos tipos de desgastes e dos mecanismos de desgaste ocorridos nas 3 condições de ferramentas avaliadas, foram capturadas imagens dos gumes a cada parada realizada para medição dos desgastes. No decorrer dos testes de usinagem, realizados com as ferramentas escovadas com esponja rígida, durante as paradas para medição dos desgastes de flanco, foi identificada a presença de material aderido em alguns gumes das ferramentas testadas. No entanto, este fenômeno ocorreu de forma discreta e com pequenos volumes. Na ferramenta A10, foi detectada a presença de material aderido até a parada de 20160 mm lineares usinados, já para a ferramenta A14 ocorreu adesão até a parada de 10080 mm lineares usinados. A Figura 28 apresenta imagens de um gume na primeira parada para medição do desgaste e

também após o fim de vida. Nas imagens é possível verificar os tipos de desgastes ocorridos para a condição de gumes escovados com esponja rígida.

Figura 28 - Desgastes ocorridos nas fresas escovadas com esponja rígida

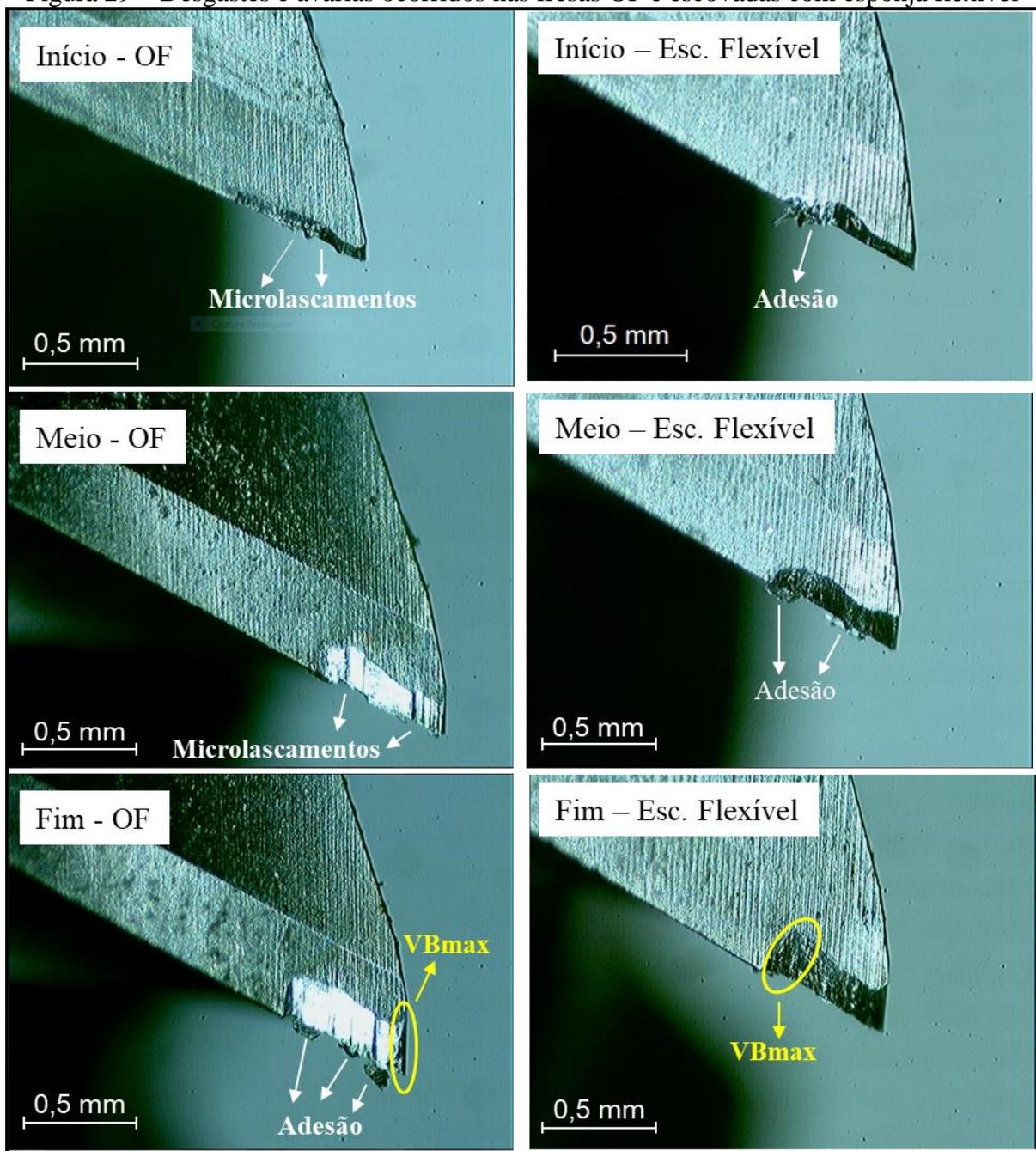


Fonte: o autor (2020)

Analisando a Figura 28, verifica-se que o desgaste predominante nas ferramentas escovadas com esponja rígida foi o desgaste de flanco, já que não foi possível detectar a presença de outros desgastes e avarias como os microlascamentos. De maneira geral, em usinagem, o desgaste de flanco é gerado principalmente pelo mecanismo de abrasão, o qual ocorre devido ao atrito existente entre o flanco dos gumes das ferramentas e a superfície usinada do material. Este atrito causa a perda contínua e progressiva do material a nível atômico ou a nível do grão do mesmo, gerando a marca do desgaste de flanco, a qual foi usada para a medição e determinação do fim de vida das ferramentas testadas.

Na análise dos tipos de desgastes e dos mecanismos de desgaste ocorridos, nas ferramentas escovadas com esponja flexível e nas ferramentas originais de fábrica, foi verificado que os mecanismos de desgaste predominantes foram a abrasão e a adesão, porém microlascamentos também ocorreram. A Figura 29 apresenta imagens de um gume da ferramenta original de fábrica e de um gume da ferramenta escovada com esponja flexível. Para ambas as condições a figura mostra os tipos de desgastes predominantes durante os testes.

Figura 29 – Desgastes e avarias ocorridos nas fresas OF e escovadas com esponja flexível



Fonte: Adaptado de Ost (2016)

De modo geral, as ferramentas originais de fábrica apresentaram a maior ocorrência de microlascamentos quando comparadas com as ferramentas escovadas, tanto com esponja rígida quanto com esponja flexível, uma hipótese para explicar isto é que o escovamento gera um tratamento nos gumes das ferramentas reduzindo ou removendo os defeitos e irregularidades do gume, provenientes do processo de afiação por retificação. Dessa forma, diminui a possibilidade de esses defeitos e irregularidades virem a se tornar avarias maiores, como os microlascamentos durante a usinagem. No entanto, a ocorrência de microlascamentos parece não ter afetado a vida útil das ferramentas com a mesma intensidade que o mecanismo de abrasão, já que as ferramentas originais de fábrica mesmo apresentando a maior ocorrência de microlascamentos, retornaram a maior vida útil entre as 3 condições avaliadas.

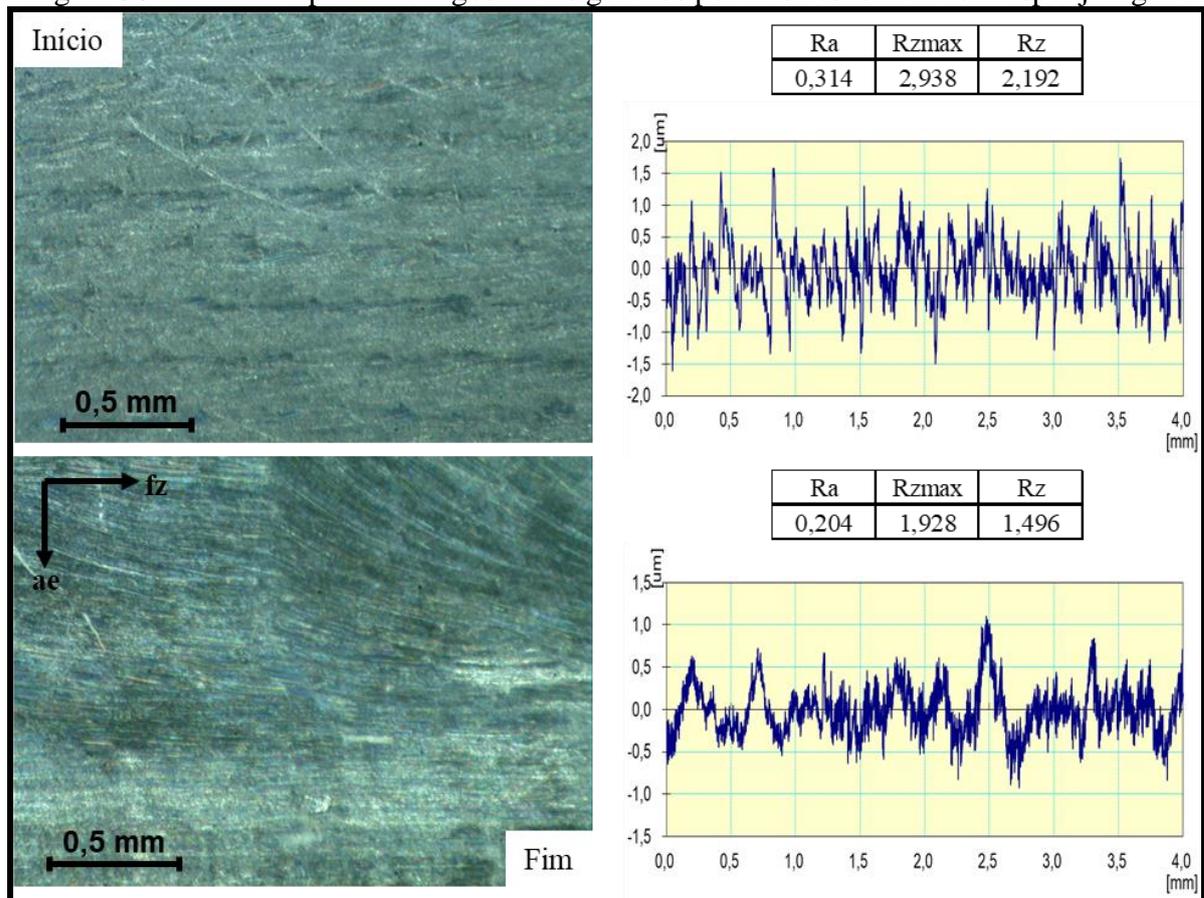
Este fato reforça a hipótese que a redução da vida útil das ferramentas escovadas está relacionada aos maiores valores de rugosidades de seus gumes quando comparadas com as ferramentas originais de fábrica, pois como visto no item 4.3.1 o aumento da rugosidade eleva também o atrito entre o gume e a superfície usinada, intensificando o mecanismo de abrasão que é o principal causador do desgaste de flanco.

No trabalho de Zanella (2018), foi comparada a vida útil de 3 condições de fresas revestidas com diamante policristalino na usinagem de grafite. As condições testadas foram fresa original de fábrica, fresa polida por cerdas abrasivas e fresas tratadas em acabamento por arraste. A condição que retornou a maior vida útil foi a de acabamento por arraste, sendo seguida pela condição de polimento por cerdas abrasivas e com a menor vida útil ficou a condição original de fábrica. O autor relacionou os resultados com as rugosidades apresentadas pelos gumes das fresas, que no caso as fresas originais de fábrica apresentaram os maiores valores de rugosidades em seus gumes dentre as 3 condições avaliadas.

4.4 Qualidade superficial do corpo de prova

As análises das superfícies geradas no corpo de prova pelas ferramentas, no decorrer dos testes de usinagem, foram feitas qualitativamente por imagens de textura junto com o respectivo perfil de rugosidades e quantitativamente através de medições de alguns parâmetros de rugosidade. Estas análises foram realizadas com o objetivo de comparar os resultados obtidos para cada condição de fresas avaliadas neste trabalho. As Figuras 30, 31 e 32 apresentam as texturas, perfis de rugosidades e a média de rugosidades, para início e fim de vida de uma das ferramentas testadas de cada condição avaliada.

Figura 30 - Textura e perfil de rugosidades gerados por fresa escovada com esponja rígida



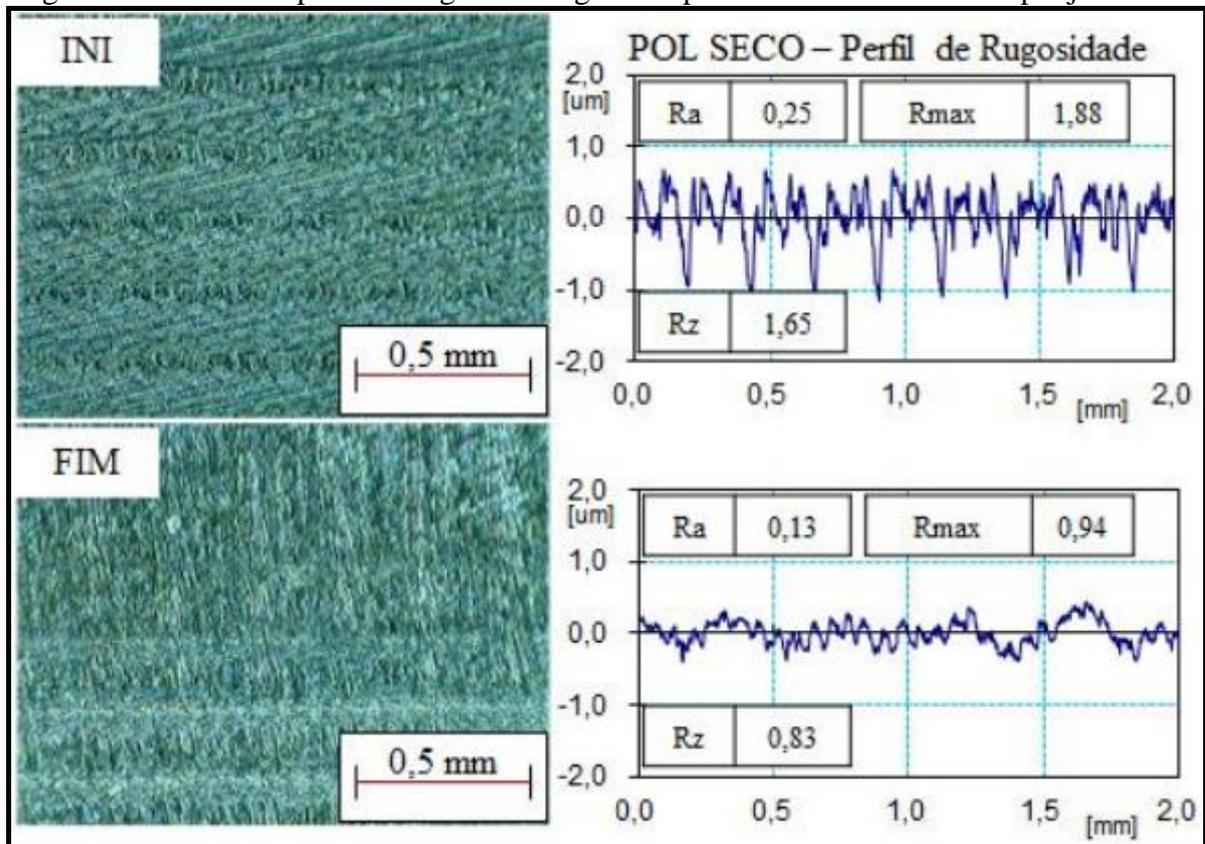
Fonte: o autor (2020)

Como se pode observar na Figura 30, a superfície de início apresenta, de forma bastante discreta, as marcas de passagem da ferramenta escovada com esponja rígida. Mas, não é possível visualizar as marcas dos sulcos gerados pelas quinas dos gumes da mesma, uma hipótese para explicar isto é que o a_e utilizado nos testes de usinagem é bastante pequeno quando comparado ao diâmetro das ferramentas utilizadas. Este fato faz com que a ferramenta realize múltiplos passes com seus gumes secundários sobre as superfícies já usinadas, alterando a textura das mesmas. Porém, o perfil de rugosidades apresenta um padrão que se repete linearmente, o que é característico de superfícies geradas por ferramentas no início de vida, onde seus gumes normalmente apresentam pequenos desgastes.

Já a superfície gerada pela ferramenta no fim de vida, não apresenta marca alguma que caracterize as passagens da ferramenta e o perfil de rugosidades demonstra irregularidades, isso ocorre devido ao elevado desgaste dos gumes da ferramenta neste momento de sua vida útil, fazendo com que a ferramenta não corte com a mesma eficiência que tinha no início de sua vida, gerando maiores deformações plásticas no material usinado, recalando o mesmo contra a superfície usinada e reduzindo os sulcos gerados pela passagem da ferramenta. Este fato pode

ser uma hipótese para explicar a redução das rugosidades do início para o fim da vida útil da ferramenta.

Figura 31 - Textura e perfil de rugosidades gerados por fresa escovada com esponja flexível

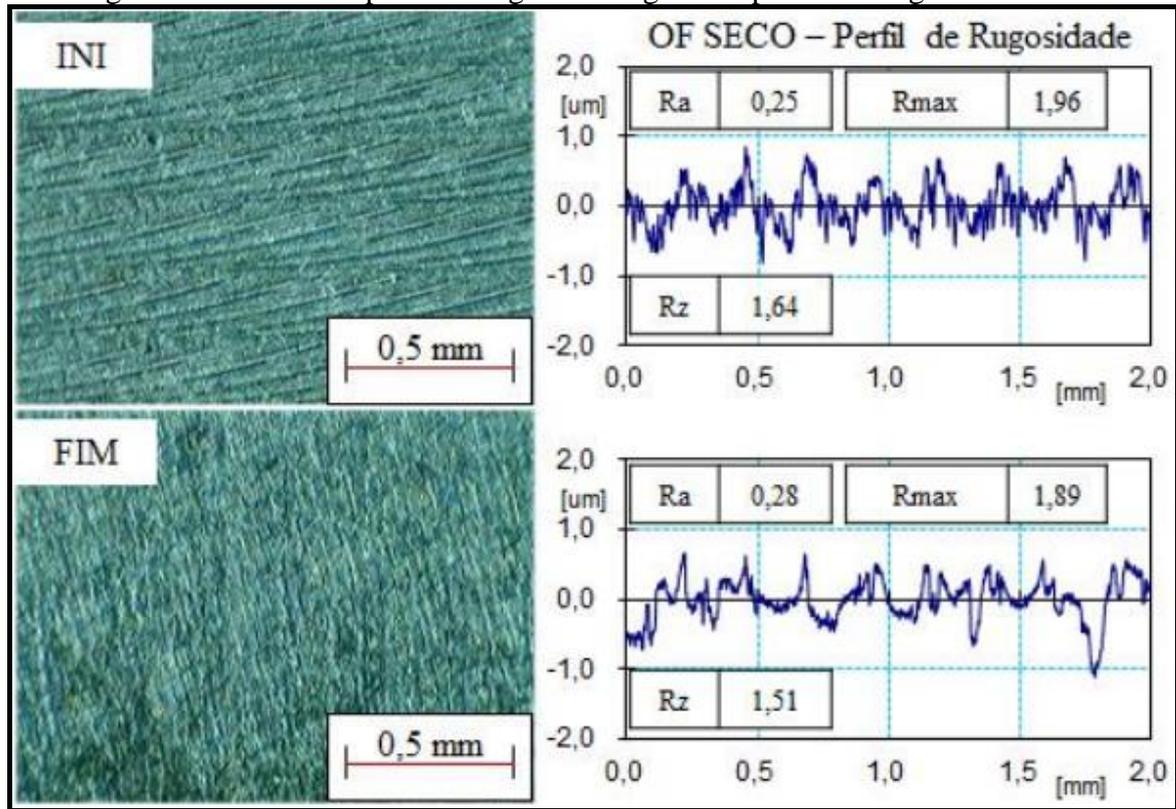


Fonte: Adaptado de Ost (2016)

Analisando a Figura 31, a superfície de início apresenta de forma bem definida as marcas de passagens da ferramenta escovada com esponja flexível, junto com um perfil de rugosidades que tem um padrão que se repete linearmente.

Porém, a superfície usinada pela ferramenta no fim de sua vida útil, praticamente não apresenta as marcas das passagens da ferramenta, pois estas se mostram muito sutis apenas na região inferior da imagem, e conforme se analisa a região superior da imagem, partindo do meio da mesma, que é a região que registra os últimos passes da ferramenta sobre o corpo de prova, percebe-se que essas marcas sutis já não ocorrem. Além disso, o perfil de rugosidade se mostra com um comportamento irregular e as rugosidades geradas pela ferramenta em seu início de vida são maiores do que as geradas no fim de vida. Estas características ocorrem possivelmente pelos mesmos motivos já explicados para a superfície de fim de vida gerada pela ferramenta escovada com esponja rígida.

Figura 32 – Textura e perfil de rugosidades gerados por fresa original de fábrica

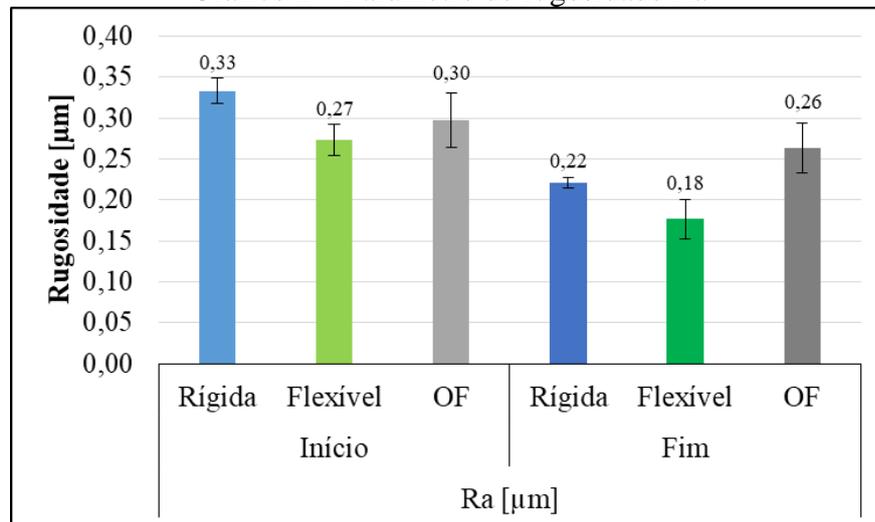


Fonte: Adaptado de Ost (2016)

Da mesma forma que para a superfície de início gerada pela ferramenta escovada com esponja flexível, a superfície de início usinada pela ferramenta original de fábrica apresenta de forma bem definida as marcas de passagem da ferramenta, junto com um perfil de rugosidade que tem um padrão que se repete linearmente. Já a superfície de fim não apresenta marca alguma que caracterize as passagens da ferramenta original de fábrica e o perfil de rugosidade tem um comportamento irregular, da mesma forma como ocorreu para a superfície de fim usinada pela ferramenta escovada com esponja rígida, e possivelmente pelos mesmos motivos. Mas, para esta condição de ferramenta os valores do parâmetro de rugosidades Ra das superfícies não tiveram diferenças significativas do início para o fim de vida. Uma hipótese para explicar isto é o fato de que as ferramentas originais de fábrica demonstraram ter a maior ocorrência de microlascamentos em seus gumes no decorrer dos testes de usinagem dentre as 3 condições avaliadas. Fazendo uma comparação entre as superfícies de início de vida das 3 condições de ferramentas avaliadas, percebe-se que para a condição escovada com esponja flexível e condição original de fábrica as marcas de passagens da ferramenta são significativamente mais bem definidas que para a condição escovada com esponja rígida, uma explicação para isto é que no trabalho de Ost (2016), durante os testes de usinagem, foi utilizado um corpo de prova

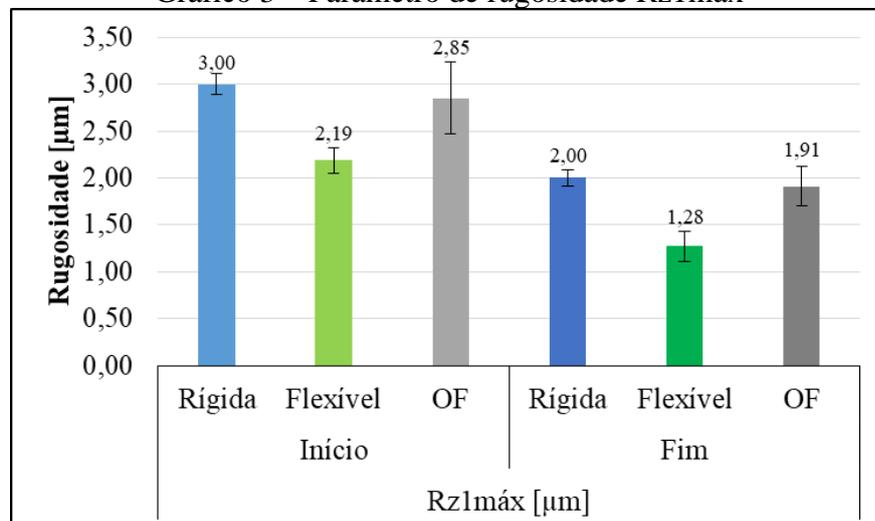
para desgastar as ferramentas e outro específico para registrar as texturas, dessa forma os gumes secundários das ferramentas não realizavam muitos passes sobre as superfícies já usinadas, não afetando as texturas. A seguir, é apresentado o Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4, nos quais são mostrados os valores das rugosidades médias, calculadas através dos valores obtidos das medições realizadas nas superfícies usinadas pelas 2 ferramentas testadas para cada condição avaliada, tanto para início quanto para o fim da vida das ferramentas. No Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4 são mostrados respectivamente os parâmetros de rugosidades Ra, Rz1max e Rz. Nos três gráficos, as barras em azul foram geradas por dados obtidos pelos experimentos deste trabalho, já as barras em verde e cinza foram geradas por dados obtidos nos experimentos do trabalho de Ost (2016).

Gráfico 2 – Parâmetro de rugosidade Ra



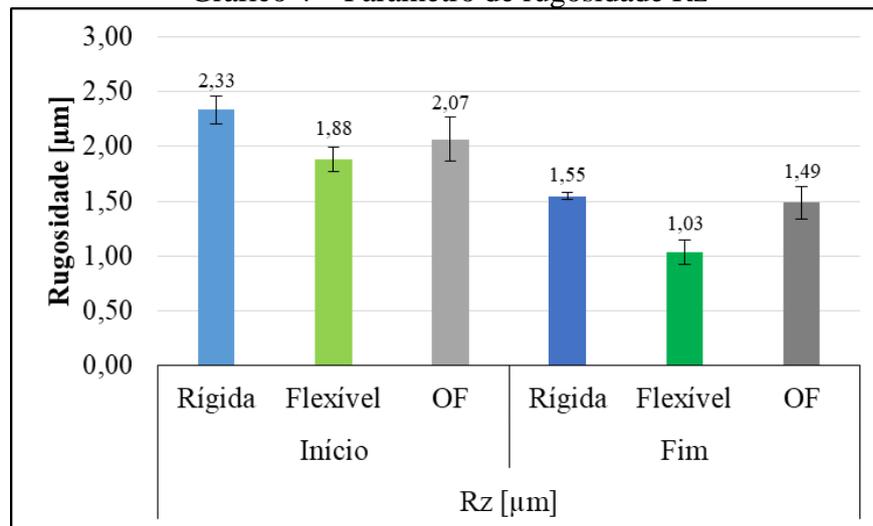
Fonte: Barras em verde e cinza, Ost (2016) e barras em azul, o autor (2020)

Gráfico 3 – Parâmetro de rugosidade Rz1max



Fonte: Barras em verde e cinza, Ost (2016) e barras em azul, o autor (2020)

Gráfico 4 – Parâmetro de rugosidade Rz



Fonte: Barras em verde e cinza, Ost (2016) e barras em azul, o autor (2020)

Analisando os gráficos, percebe-se que de maneira geral, para todos os parâmetros de rugosidades medidos, em todas as condições avaliadas, os valores de rugosidades são superiores nas superfícies geradas pelas ferramentas em seu início de vida do que no fim de vida. Esta característica comum entre as 3 condições de ferramentas acontece porque, no início de vida as ferramentas passam por um processo de ajuste de gume, onde os gumes sofrem uma adequação ao sistema tribológico envolvido no corte, por este motivo é que os sulcos gerados pelos gumes na superfície usinada tendem a ser maiores, elevando os valores de rugosidade.

Comparando os valores dos parâmetros de rugosidades gerados pela condição escovada com esponja rígida com a condição original de fábrica, se nota que não há diferenças consideráveis, a não ser para o parâmetro Ra no fim de vida.

No entanto, os valores das rugosidades gerados na superfície usinada pela condição escovada com esponja rígida e original de fábrica, são consideravelmente maiores em relação aos mesmos gerados pela condição escovada com esponja flexível, para todos os parâmetros medidos, tanto para início quanto para o fim de vida, visto que as médias das rugosidades geradas pela condição escovada com esponja flexível são as menores registradas entre as 3 condições avaliadas, principalmente no final de vida das mesmas. Uma hipótese para explicar isso, é que no processo de escovamento aplicado nas ferramentas escovadas com esponja flexível, a penetração radial entre escova e ferramenta foi de 4 mm, fazendo com que o escovamento atuasse em toda a extensão dos gumes secundários das ferramentas, possivelmente gerando arredondamentos nos mesmos. Esses arredondamentos fazem com que no momento da usinagem uma porção maior do material que deveria migrar para o cavaco seja

recalcado sobre a superfície usinada, reduzindo a medida dos sulcos gerados pela passagem da ferramenta, com isso reduzindo os valores das rugosidades.

Segundo Rodrigues (2009), no corte realizado por gumes arredondados existe um ponto de separação para o fluxo de material. Admite-se que acima desse ponto o material escoava para o cavaco, porém o material que fica abaixo desse ponto é recalcado pela ferramenta contra a superfície usinada, formando a superfície da peça. Este fenômeno é melhor representado na Figura 10 do capítulo 2.

Já para as ferramentas escovadas com esponja rígida, a penetração radial entre escova e ferramenta foi aproximadamente de 1 mm, assim não atuando em toda a extensão dos gumes secundários das ferramentas, fazendo com que os gumes mantivessem, na maior parte de sua extensão, as características de um gume afiado por processo de retificação, ou seja, as mesmas características dos gumes das ferramentas originais de fábrica. Estes fatos também podem ser uma explicação para as ferramentas escovadas com esponja rígida e originais de fábrica terem gerado valores de rugosidades de mesma grandeza.

Conforme Klocke (2018), o processo de fresamento de topo, se empregado na usinagem de superfícies planas, forma as mesmas por meio dos gumes secundários da fresa, ou seja, os gumes secundários são responsáveis pelas características apresentadas nas superfícies usinadas. No entanto, o cisalhamento do material e a remoção do cavaco, são realizados pelos gumes primários. Estes fatores reforçam a hipótese apresentada, neste trabalho, para explicar o porquê que as superfícies geradas pelas ferramentas escovadas com esponja flexível retornaram nos menores valores de rugosidades dentre as 3 condições de ferramentas avaliadas, pois como já mencionado, a condição escovada com esponja flexível foi a única que teve um escovamento atuante em toda a extensão dos gumes secundários.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho colaboram para uma melhor compreensão dos tratamentos de gume executados em ferramentas de corte através do processo de escovamento e também na influência dos mesmos na usinagem.

A caracterização das ferramentas, permitiu verificar o resultado do escovamento realizado com esponja rígida na superfície dos gumes e determinar se o mesmo realmente gerou algum tipo de tratamento. Além disso, através das medições de rugosidades realizadas nos gumes das ferramentas escovadas com esponja rígida, foi possível fazer um comparativo dimensional com as demais condições avaliadas. Os gumes da ferramenta escovadas com esponja rígida apresentaram arredondamentos tendendo tanto para o flanco quanto para a face, mostrando que o escovamento com esponja rígida foi efetivo em gerar um tratamento no gume. Porém, foram notadas a presença de marcas de abrasividade paralelas ao gume principal na região do flanco. E após serem feitas as medições de rugosidades dos gumes e comparadas as mesmas com as rugosidades dos gumes da ferramenta original de fábrica, foi comprovado que essas marcas de abrasividade aumentaram de forma bastante significativa as rugosidades dos gumes, já que dentre as 3 condições de ferramentas avaliadas, a ferramenta escovada com esponja rígida apresentou os maiores valores de rugosidades na direção paralela ao gume principal.

Quanto aos desgastes e avarias, ao que tudo indica, os mecanismos de desgaste mais atuantes nas 3 condições de ferramentas avaliadas foram a abrasão e a adesão. As ferramentas originais de fábrica apresentaram a maior ocorrência de microlascamentos, sendo seguidas pelas ferramentas escovadas com esponja flexível e com esponja rígida respectivamente. Uma hipótese para explicar isto é que o escovamento gera um tratamento nos gumes das ferramentas reduzindo ou removendo os defeitos e irregularidades do gume, provenientes do processo de afiação por retificação. Dessa forma, diminui a possibilidade de esses defeitos e irregularidades virem a se tornar avarias maiores, como os microlascamentos, durante a usinagem.

Considerando a vida útil das ferramentas, a condição escovada com esponja rígida apresentou a menor dentre as 3 condições avaliadas, tendo uma vida útil 21,63 % menor que a condição original de fábrica, considerando o fim de vida pré-determinado para o desgaste de flanco $VB_{max} = 0,2$ mm, seguida da condição escovada com esponja flexível que apresentou uma vida 6,92 % menor. Com isso, percebe-se a forte relação da vida útil das condições de ferramentas avaliadas com a rugosidade medida em seus gumes, visto que a condição escovada com esponja rígida apresentou os maiores valores de rugosidades, sendo seguida pela condição

escovada com esponja flexível e com as menores rugosidades ficou a condição original de fábrica. No entanto, é importante salientar que os resultados obtidos neste trabalho, para os testes de usinagem, apenas são válidos para as condições de corte aqui utilizadas, as quais são descritas no item 3.1.1, já que qualquer mudança nessas condições, possivelmente, retornaria resultados diferentes.

As medições de rugosidade realizadas nas superfícies geradas pelas ferramentas mostraram que não houve diferenças significativas entre a condição escovada com esponja rígida e a condição original de fábrica, porém valores menores foram obtidos com a condição escovada com esponja flexível, isto pode ser explicado pelo fato de que o processo de escovamento aplicado com esponja flexível foi atuante em toda a extensão dos gumes secundários, os quais são responsáveis por gerar as características da superfície usinada, enquanto que o processo de escovamento com esponja rígida atuou em uma pequena parte dos gumes secundário, assim a maior parte da extensão dos mesmos se manteve com as características de gumes afiados por processo de retificação.

Contudo, apesar de apresentar a menor vida útil, a condição escovada com esponja rígida se mostrou resistente contra uma das principais avarias que ocorrem em operações de fresamento, o microlascamento. Assim, através de aprimoramentos no processo de escovamento, que possam reduzir os valores de rugosidade gerados nos gumes ou fazer com que os sulcos gerados nos mesmos tenham a direção da velocidade de corte durante a usinagem, junto com a utilização de uma esponja rígida menos abrasiva, esta condição tem potencial para chegar a resultados mais satisfatórios.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar as características do tratamento de gume gerado pelo processo de escovamento utilizando esponjas abrasivas rígidas com grau de abrasividade fino e extra fino.

Avaliar as características apresentadas por gumes escovados com esponjas rígidas compostas por outros abrasivos, como o carboneto de silício.

Analisar o comportamento de desgaste de fresas escovadas com esponja rígida, onde o eixo de rotação do disco da esponja esteja posicionado paralelo ao eixo de rotação da fresa para realizar o escovamento.

Avaliar o efeito das direções de escovamento no atrito existente entre o flanco dos gumes de fresas e a superfície usinada e também no fluxo do cavaco sobre a superfície de saída dos gumes.

Analisar a esponja rígida por meio de imagens de MEV.

REFERÊNCIAS

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-dobrasil/~/Folhas-de-Acabamento-Scotch-Brite-MultiFlex/?N=5002385+8709320+3293186372&preselect=8710644+3293786499&rt=rud. Acesso em: 13 maio 2020

3M (Canadá). **Roda Unitizada Scotch-Brite™ EXL**. 2020. Disponível em: https://www.3mcanada.ca/3M/en_CA/company-ca/all-3m-products/~/Scotch-Brite-EXL-Unitized-Wheel-XL-UW-2A-MED-6-in-x-1-2-in-x-1-in-15-24-cm-x-1-27-cm-x-2-54-cm-/?N=5002385+8711017+3293794116+3294529206&rt=rud. Acesso em: 25 outubro 2020

ARGENTA, F. L. **Avaliação da usinabilidade dos aços DIN 1.2711 e uddeholm nimax através da usinagem com ferramentas pequenas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, 2015.

ARMAREGO, E. J. A.; DESHPANDE, N. P. Computerized End-Milling Force Predictions with Cutting Models Allowing for Eccentricity and Cutter Deflections. **Annals of the CIRP**, v. 40, n. 1, p. 25-29, 1991.

AURICH, J. C.; EFFGEN, C. Influence of the machining conditions when preparing cutting edges with elastic bonded grinding wheels. **Production Engineering. Research and Development**, 9:329–336, 2015.

BASSETT, E.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. On the Honed Cutting Edge and its Side Effects During Orthogonal Turning Operations of AISI1045 with Coated WC-Co Inserts. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, n. 5, p. 108– 126, 2012.

BERGMANN, B.; DENKENA, B.; GROVE, T.; PICKER, T. 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 (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 243p, 1999.

BORDIN, F. M. **Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metalduro sobre a integridade superficial dos furos**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica), Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, RS, 128p, 2013.

BUCKELL, W. **Avaliação da Preparação de Gume Através do Processo de Escovação para Aplicação em Fresamento de Topo Reto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, 2019.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: an Introduction: John Wiley & Sons, Inc**, 2003.

COSTA, A. R. **Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Insertos Intercambiáveis**. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2003.

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, B.; KOEHLER, J.; REHE, M. Influence of the Honed Cutting Edge on Tool Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 1, p.190-195, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.033>.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. MM Editora. 1999.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3ª ed. São Paulo: Art Líber Ltda, 2001.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Artliber, 248 p. 2003.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2013. 270p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Art Líber Editora, 2014.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 5 ed. São Paulo: Ed. Blücher, 1977. 751 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda, 1981.

FERRER, J. A. G. **Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento**. 228 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UNICAMP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Campinas, 2006.

FRACARO, J. **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§ion=0#/legacy/128237>. Acesso em: 16 Abril 2020.

GROOVER, M. 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.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. Sixth edition. Pearson. 2009.

KISHAWY, H. A.; DUMITRESCU, M.; NG, E. -G.; ELBESTAWI, M. A. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 45–2:219–227, 2005.

KLOCKE, F. **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>.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 8 ed. Aachen, Germany: Springer Verlag, 504 p. 2008.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 6.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1997.

LIMA, R. O. C.; MELO, A. C. A. **Análise do desgaste e das avarias em insertos de metal duro após o fresamento com ar quente**. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

MACHADO E SILVA, A. R. . M. B. **Usinagem dos metais**. 4. ed. Uberlândia-MG: Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 1999. 224p.

MACHADO E SILVA, A. R. . M. B. **USINAGEM DOS METAIS**. Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 384 p. 2009.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T. **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§ion=0#/legacy/171653>. Acesso em: 20 Abril 2020.

MARKUS, W. **Aspectos tecnológicos da minimização e eliminação de fluido de corte no processo de torneamento com insertos de metal-duro revestidos com TiN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MATHAI, G.; MELKOTE, S. 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.

MELO, A.C.A.; VIANA, R.; BARBOSA, F. Q.; MACHADO, A. R. Variação da Temperatura de Usinagem com a Profundidade de Corte e Avanço por dente no Fresamento de Topo, **9º Colóquio De Usinagem**, Uberlândia 2005.

NICOLA, G. L. **Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço AISI H13 endurecido**. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia e Ciência dos Materiais), Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, RS, 137p, 2008.

OLIVEIRA, J. M. **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas para Produção de Moldes e Matrizes**. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia e Ciência dos Materiais), Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, RS, 110 p, 2006.

OSG, S. **Catálogo de produtos**. Brasil, 2019. Disponível em: https://osg.com.br/docs/catalogos/catalogo_geral_osg/web/html5. Acesso em: 18 Abril 2020.

OST, C. A. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço p20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificarrefrigerantes**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica), Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

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.

PAUCKSH, E.; HOLSTEN, S.; LINß, M.; TIKAL, F. **Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien**, 12. Vieweg-Teubner, 2008.

PETERSON, M. B.; BHANSALI, K. J.; WHINTENTON, E. P.; IVES, L. K. Galling wear of Metals. *Wear*. Vol. 5, 1985, pp. 293-301.

REBEYKA, C. J. **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§ion=0#/legacy/42171>.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, SP, 2005.

RODRÍGUES, 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, 2009.

SANDVIK, C. **Manual técnico de usinagem**, Sandviken, Suécia, 1999.

SANDVIK, C. **Catálogo de Ferramentas Rotativas**, 2001.

SANDVIK, C. **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: 24 Abril 2020.
- SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. USA, Claredon Press, Oxford, New York, 1984.
- 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.
- SILVEIRA, J. F. **Fresamento Toroidal do Aço ABNT H13 Endurecido, com Ferramentas de Cermet e de Metal Duro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de pós-Graduação em engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2002.
- SOMMER, H. **Untersuchung von Schneidkanten-architekturen im Bezug auf den Zerspanprozess**. Giesserei Technik Kassel, 2013.
- SOUZA JR, A.M .; SALES, W. F.; SANTOS, S.C.; MACHADO, A. Performance of single Si3N4 and mixed Si3N4 + PCBN wiper cutting tools applied to high speed face millig of cast iron. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 45, p. 335-344, 2005.
- STANGO, R. 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, C. E. **Ferramentas de corte I**. 4. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos abrasivos**. 3. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2005.
- TABENKIN, A. **Surface finish: a machinist's tool. A design necessity**, 1999. Disponível em: <<https://www.mmsonline.com/articles/surface-finish-a-machinist39s-tool-adesign-necessity>>. Acesso em: 21 Abril 2020.
- TIKAL, F. **Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden**. Kassel University Press, 2009.
- TOENSHOFF, H. K.; DENKENA, B. **Basics of Cutting and Abrasive Processes**. Springer, 2013.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Butterworths&C0, London, 2000.
- USINAGEM BRASIL. **A Indústria 4.0 na fabricação de moldes e matrizes**. usinagem brasil, 2019. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/13933-a-industria-40-na-fabricacao-de-moldes-e-matrizes/pa-1/>>. Acesso em: março 2020.
- VENTURA, C. E. H.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning. **Journal of Manufacturing Processes**, 19:129–134, 2015.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B.; POLLI, M. L.; GOMES, J. O.; PAES, A. **Influência do comprimento em balanço da ferramenta sobre a estabilidade dinâmica do fresamento de topo reto à altas velocidades.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

ZANELLA, C. **Efeito do Tratamento da Microgeometria de Ferramentas com Revestimento Diamantado no Fresamento de Eletrodo de Grafite.** Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica), Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

ZEILMANN, R. P. **GEODEF**, 2019. Caxias do Sul: Notas de Aula, 2019. 59 slides, color.

ZEILMANN, R. P.; CALZA, D. C.; XAXIER, E. B. Influência das condições de aplicação de fluido lubrificante sobre a qualidade superficial para o processo de furação. **Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.** Foz do Iguaçu, 2006.