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

VINICIUS CARAZAI MORAES

INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DO GUME POR ESCOVAMENTO NA USINAGEM COM FRESA DE TOPO

CAXIAS DO SUL 2020

VINICIUS CARAZAI MORAES

INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DO GUME POR ESCOVAMENTO NA USINAGEM COM FRESA DE TOPO

Trabalho de conclusão de curso da disciplina de TCC II (MEC0291AH), apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Área da concentração: Projeto e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann.

CAXIAS DO SUL 2020

VINICIUS CARAZAI MORAES

INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DO GUME POR ESCOVAMENTO NA USINAGEM COM FRESA DE TOPO

Trabalho de conclusão de curso da disciplina de TCC II (MEC0291AH), apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Área da concentração: Projeto e Fabricação.

Aprovado em 24/11/2020

Banca Examinadora

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann Universidade de Caxias do Sul – UCS

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

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano Universidade de Caxias do Sul - UCS



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe Clair, por me apoiar incondicionalmente em todo o trajeto desta caminhada e realização deste sonho em especial.

A minha esposa, que me apoiou de todas as formas possíveis para que juntos possamos concretizar mais esta conquista.

Ao meu filho Vitor, que mesmo sem entender a ausência do pai em determinados momentos tem demonstrado enorme amor, carinho e agradecimento em cada segundo possível que estamos juntos, me inspirando e dando toda a força necessária para sempre seguir em frente.

Também agradeço imensamente ao Davi meu segundo filho, pois já me traz muita alegria mesmo sendo recém-nascido. Todos os dias ele me dá um belo exemplo interagindo com as brincadeiras do papai de forma eufórica demonstrando o que realmente é importante nesta vida.

Ao Prof. Rodrigo P. Zeilmann, meu orientador, que proporcionou uma experiência de grande valia na minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

A Universidade de Caxias do Sul, pela utilização das suas dependências e equipamentos na realização deste trabalho.

Aos colaboradores da UCS, pelo seu empenho e conhecimento durante a realização da parte experimental deste trabalho.

Finalmente a todos que de alguma forma contribuíram durante toda minha caminhada acadêmica, meu muito obrigado.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar a influência da preparação do gume pelo processo polimento com escovas abrasivas, aplicado ao fresamento de topo. A exigência atual da indústria voltada à usinagem tem incentivado o desenvolvimento de novas técnicas que possibilitem um melhor desempenho das ferramentas de corte. Atendendo a essas demandas, o tratamento do gume atua diretamente na interação entre peça e a ferramenta, proporcionando ganhos sobre a vida útil e qualidade superficial da peça acabada. Norteado por essas premissas, foram executados ensaios de usinagem com fresas de topo preparadas por escovas abrasivas com diferentes tipos de orientação de seus filamentos, comparando os resultados a uma fresa sem preparação. A preparação do gume ocorreu de forma padronizada e utilizou escovas dotadas de cerdas abrasivas dispostas radialmente e escovas compostas de cerdas com orientação randômica (esponja abrasiva). O desempenho voltado à qualidade superficial das ferramentas foi avaliado através das medições de rugosidade e textura da superfície usinada, gerados no início e no fim da vida útil de cada ferramenta. As texturas avaliadas foram semelhantes entre si, tanto para o início quanto para o final dos ensaios, não apresentando diferenças significativas. A rugosidade avaliada nos corpos de prova apresentou resultados semelhantes no início do processo para todas as condições testadas, no final, os menores valores de rugosidade foram atribuídos as ferramentas que receberam o tratamento do gume. Sobre a vida útil das ferramentas as curvas de comportamento de desgaste apontaram resultados distintos. A preparação utilizando escovas com cerdas radiais resultou em um aumento de 8% na vida útil das ferramentas se comparado a uma ferramenta sem preparação. Já a preparação com o uso de esponjas abrasivas obteve uma vida útil 8% inferior em comparação com uma fresa sem preparação da ponta. Os mecanismos de desgaste predominantes foram a abrasão e adesão.

Palavras-Chave: Preparação do Gume. Preparação por Escovamento. Cerdas Abrasivas. Fresamento de Topo. Desgaste. Qualidade Superficial.

ABSTRACT

The aim of this work is to study the influence of the cutting preparation by the polishing process with abrasive brushes, applied to end milling. The current requirement of the industry focused on machining has encouraged the development of new techniques that allow a better performance of the cutting tools. Meeting these demands, the cutting treatment acts directly on the interaction between the part and the tool, providing gains on the useful life and surface quality of the finished part. Guided by these premises, machining tests were performed with end mills prepared by abrasive brushes with different types of orientation of their filaments, comparing the results to a mill without preparation. The preparation of the cutting edge occurred in a standardized way and used brushes with abrasive bristles arranged radially and brushes composed of bristles with random orientation (abrasive sponge). The performance related to the surface quality of the tools was evaluated through the measurements of roughness and texture of the machined surface, generated at the beginning and at the end of the useful life of each tool. The evaluated textures were similar to each other, both for the beginning and the end of the tests, with no significant differences. The roughness evaluated in the specimens showed similar results at the beginning of the process for all conditions tested, in the end, the lowest values of roughness were attributed to the tools that received the edge treatment. Regarding tool life, wear behavior curves showed different results. Preparation using brushes with radial bristles resulted in an 8% increase in tool life compared to a tool without preparation. The preparation with the use of abrasive sponge, on the other hand, obtained a service life 8% lower in comparison with a mill without preparation of the tip. The predominant wear mechanisms were abrasion and adhesion.

Keywords: Cutting Edge Preparation. Brushing Preparation. Abrasive Bristles. End Milling. Wear. Surface Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos convencionais de fresa de topo	19
Figura 2 – Fresamento concordante e discordante	20
Figura 3 – Terminologia cunha de corte	21
Figura 4 – Ilustração fator de forma (K)	22
Figura 5 – Exemplo de diferentes raios de gume	23
Figura 7 – Principio de escoamento do cavaco em um gume preparado	24
Figura 6 – Processo de preparação do gume	24
Figura 8 – Distribuição de temperaturas com diferentes raios do gume	25
Figura 9 – Cinemática no processo de escovamento com cerdas abrasivas	28
Figura 10 – Microscopia de uma esponja abrasiva	30
Figura 11 – Representação do desgaste em ferramentas de corte	33
Figura 12 – Curva desgaste x tempo	34
Figura 13 – Perfil de rugosidades	38
Figura 14 – Especificação das fresas em metal-duro utilizadas nos ensaios	42
Figura 15 – Esquema de posicionamento escova x ferramenta	43
Figura 16 – Escova utilizada nos ensaios	44
Figura 17 – Análise das ferramentas sem preparação (SP)	46
Figura 18 – Análise das ferramentas polidas por esponjas abrasivas (EA)	46
Figura 19 – Análise das ferramentas polidas por cerdas abrasivas (CA)	47
Figura 20 – Caracterização esponja abrasiva (EA)	48
Figura 21 – Caracterização escova de cerdas radiais (CA)	49
Figura 22 – Textura e perfil de rugosidades ferramenta (SP)	50
Figura 23 – Textura e perfil de rugosidades ferramenta (EA)	51
Figura 24 – Textura e perfil de rugosidades ferramenta (CA-1)	51
Figura 25 – Textura e perfil de rugosidades ferramenta (CA-2)	52
Figura 26 – Comportamento do desgaste	56
Figura 27 – Caracterização dos mecanismos de desgaste	58

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Especificação dos filamentos para polimento	40
Quadro 2 – Especificações escova de cerdas abrasivas	44
Quadro 3 – Classificação das fresas utilizadas nos testes	45
Tabela 1 – Composição química aço AISI P20	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores da rugosidade inicial do corpo de prova	54
Gráfico 2 – Valores da rugosidade final do corpo de prova	54

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI American Iron and Steel Institute

[Instituto Americano de Ferros e Aços]

APC Aresta postiça de corte

CA Cerda abrasivas radiais

DIN Deutsches Institut für Normung

[Instituto Alemão de Normas]

EA Esponja abrasiva

FAN Filamento abrasivo de nylon

GUS Grupo de usinagem

HR_C Hardness Rockwell C

[Dureza Rockwell na escala C]

JIS Japanese Industrial Standards

[Padrões Industriais Japoneses]

LNTP Laboratório de novas tecnologias de produção

SP Ferramenta sem preparação da ponta

UCS Universidade de Caxias do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

profundidade lateral (mm) a_{e}

profundidade axial (mm) a_p

força normal [N] Fn

Fs força cisalhante [N]

avanço por gume [mm/gume] Fz

espessura mínima do cavaco h_{\min}

K fator de forma

KB largura do desgaste de cratera

KM distância do centro de desgaste da cratera até a aresta de corte

KT profundidade do desgaste de cratera

kW quilowatt

milímetros mm

 R_a

m/s metros por segundo

rotações por minuto rpm desvio médio aritmético de rugosidade [µm]

desvio médio quadrático da rugosidade [µm] R_{q}

 R_{y} profundidade máxima individual da rugosidade [μm]

média aritmética das rugosidades singulares [μm] R_z

Sα comprimento do arredondamento no flanco da ferramenta [µm]

comprimento do arredondamento na face da ferramenta [µm] Sγ

VB desgaste de flanco médio

 VB_c desgaste da ponta

desgaste de flanco máximo VB_{max}

 VB_N desgaste de entalhe

velocidade de corte [m/min] Vc

Vf velocidade de avanço [m/min]

ângulo de incidência ou folga [°] α_0

 β_0 ângulo da cunha de corte [°]

ângulo de saída [°] γ_0

ângulo efetivo de saída [°] $\gamma_{\rm e}$

micrometro μm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO	16
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	FRESAMENTO	18
2.1.1	Fresamento de topo	18
2.2	GEOMETRIA DA FERRAMENTA	20
2.2.1	Macrogeometria fresa de topo	20
2.2.2	Mesogeometria e microgeometria do gume	22
2.3	PREPARAÇÃO DO GUME	23
2.3.1	Preparação por escovamento	27
2.3.1.1	Escovamento com cerdas abrasivas	27
2.3.1.2	Escovamento com esponjas abrasivas	29
2.4	USINABILIDADE	30
2.4.1	Mecanismos e tipos de desgaste	31
2.4.1.1	Medição dos desgastes da ferramenta	33
2.4.1.2	Vida da ferramenta de corte	34
2.5	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	35
2.5.1	Textura	37
2.5.2	Rugosidade	37
3	METODOLOGIA	39
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1.1	Variáveis de entrada	39
3.1.2	Variáveis de saída	40
3.1.3	Corpo de prova	40
3.1.4	Equipamentos	41

3.1.5	Ferramentas	41
3.2	PREPARAÇÃO DO GUME POR CERDAS ABRASIVAS	42
3.3	TESTE DE USINAGEM	44
4	RESULTADOS	45
4.1	ENSAIOS DE USINAGEM	45
4.1.1	Caracterização das ferramentas	45
4.1.2	Caracterização das escovas	48
4.2	QUALIDADE SUPERFICIAL	49
4.2.1	Textura e rugosidade do corpo de prova	50
4.3	DEGASTE DA FERRAMENTA	55
4.3.1	Vida útil das ferramentas	55
4.3.2	Avaliação dos mecanismos de desgaste	57
5	CONCLUSÃO	59
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFE	RÊNCIAS	61
ANEX	O A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL	64

1 INTRODUÇÃO

O mercado da usinagem tem passado por grandes mudanças com o transcorrer das revoluções tecnológicas e industriais. Devido a este ambiente em constante evolução a necessidade em se criar processos de fabricação mais eficientes e ajustados as demandas de cada cliente têm norteado a indústria de máquinas e ferramentas a trabalhar em diversas áreas para atender este objetivo.

Conforme Black (1995), uma característica importante do processo de usinagem é a sua imprevisibilidade onde é o único processo de deformação plástica cuja restrição se estabelece exclusivamente pela ferramenta de corte. Em decorrência, a indústria de fabricação tem dedicado maior atenção a detalhes técnicos, desenvolvendo métodos e soluções para alterar e controlar a microgeometria do gume a fim de atenuar os defeitos após a produção das ferramentas.

Contudo, após o processo de fabricação podem ser encontrados os seguintes defeitos: rebarbas, irregularidades, microtrincas, rugosidade inadequada e queimas que podem afetar a qualidade superficial da peça a ser usinada ou a vida da própria ferramenta. O tratamento do gume consiste na geração de uma geometria específica no contorno do gume (chanfro, arredondamento ou combinação de ambos) e na mudança da microtopografia (rugosidade e textura) das superfícies da ferramenta (face e flanco) nas proximidades do gume (RODRÍGUEZ, 2009).

Atualmente existem processos de tratamento do gume baseados em princípios mecânicos, térmicos e químicos. O objetivo da preparação de gume é remover material sistematicamente, atuando diretamente na geração da geometria do gume. O acabamento pode modificar a micro topografia e alterar a rugosidade e textura das superfícies da ferramenta nas proximidades do gume (RODRÍGUEZ, 2009).

O acabamento do gume por meio do polimento com cerdas abrasivas é utilizado em aplicações onde se necessita um raio específico, produzindo superfícies homogêneas e diminuindo as imperfeições, contribuindo também para reduzir a rugosidade e melhorando o escoamento do cavaco durante o uso da ferramenta. Em conjunto com a utilização de filamentos de nylon, os grãos abrasivos comumente utilizados são o carboneto de silício (SiC) e óxido de alumínio (Al2O3). Outras alternativas são o CBN (nitreto cúbico de boro) e PCD (diamante policristalino) (RODRÍGUEZ, 2009). O resultado deste tratamento é influenciado principalmente pelo tipo de abrasivo utilizado, a orientação de contato do filamento abrasivo com o gume e o tempo de polimento.

Baseado nas informações citadas, o projeto proposto visa analisar a influência do tratamento do gume na vida da ferramenta e na qualidade superficial, realizando a preparação por escovamento com cerdas abrasivas na usinagem com fresa de topo em metal-duro.

1.1 JUSTIFICATIVA

A demanda atual da indústria manufatureira exige cada vez mais a segmentação de produtos e melhor eficiência na cadeia de produção. Para manter seu desempenho a altura da exigência atual, a indústria tem alicerçado a redução de custos na usinagem através da velocidade de produção e diminuição de gastos com ferramentas. Dentro deste âmbito, as técnicas para tratamento do gume se apresentam como uma alternativa viável para se alcançar a competitividade no mercado.

O resultado no investimento dessas técnicas se traduz em uma maior vida útil da ferramenta, quantidade menor de paradas do equipamento, melhor preparação para o processo posterior de revestimento da ferramenta e melhora no comportamento da ferramenta em contato com a superfície a ser usinada (RODRÍGUEZ, 2009). Todas essas características representam uma melhor performance da ferramenta durante sua utilização efetiva, podendo garantir um menor custo e elevar a competitividade das atuantes neste seguimento.

Conforme Rodríguez (2009) e Denkena e Biermann (2014), os processos de tratamento do gume ainda têm um caráter embrionário movido pela falta de informações e incentivos juntamente com outros fatores que colaboram para a baixa aceitação. Conforme Denkena e Biermann (2014), a dependência de equipamentos e insumos de difícil acesso e elevado custo dificultam sua implementação. Neste cenário, o polimento por escovamento se torna uma alternativa viável para atender as demandas geradas pela indústria deste seguimento.

O acabamento do gume por escovamento é caracterizado pela utilização de escovas de cerdas abrasivas e escovas com esponjas abrasivas. Entretanto, os mecanismos envolvidos neste tipo de processo ainda não estão difundidos e a quantidade de informações disponíveis sobre sua composição e propriedades ainda requerem maiores pesquisas. No que tange o uso de escovas de cerdas abrasivas, existe uma grande lacuna aberta quanto possibilidade de ensaios padronizados, comparando o seu desempenho com escovas formadas por outros tipos de filamento.

Utilizando-se destas premissas, este estudo tem como objetivo analisar a influência do processo de escovamento com a utilização de escovas de cerdas abrasivas, comparando os

resultados obtidos com estudos já realizados em função de outros tipos de filamento. O foco do trabalho prioriza o melhor desempenho da ferramenta de corte e a diminuição dos custos utilizando de insumos disponíveis em nossa região. Paralelamente o estudo visa proporcionar melhor entendimento do processo e prover informações técnicas para uma maior disseminação dessas práticas.

1.2 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

O presente trabalho foi desenvolvido nas dependências da Universidade de Caxias do Sul (UCS) utilizando o Laboratório de Usinagem da instituição a fim de desenvolver as atividades necessárias para a realização deste trabalho.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência do processo de tratamento do gume por escovamento na usinagem com fresa de topo.

1.3.2 Objetivos específicos

Paralelo ao objetivo geral, este trabalho desenvolveu os seguintes objetivos específicos listados abaixo:

- a) estudar e compreender os mecanismos envolvidos no processo de tratamento do gume por escovamento;
- b) realizar a preparação das ferramentas com o uso de escovas de cerdas abrasivas;
- c) avaliar a microgeometria da ponta da ferramenta após o tratamento do gume: polimento por cerdas abrasivas;
- d) avaliar a influência da preparação da microgeometria com cerdas abrasivas quanto à vida útil da ferramenta;
- e) avaliar a influência da preparação da microgeometria com cerdas abrasivas quanto à qualidade superficial da peça;

 f) comparar os resultados obtidos com a preparação por cerdas abrasivas em relação a outros tipos de microgeometrias já testadas: acabamento com esponja abrasiva e ferramenta sem preparação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FRESAMENTO

Conforme definição da norma DIN 8580 (2003), usinagem é todo o processo de fabricação onde ocorre remoção de material sobre forma de cavaco. Operações de usinagem podem ser descritas como aquelas que atribuem à peça sua forma, dimensão ou acabamento, com produção de cavaco (FERRARESI, 1970).

O fresamento é uma operação de usinagem onde a remoção do material é feita pelo movimento circular da ferramenta, enquanto a peça efetua o movimento de avanço. A ferramenta pode possuir uma ou mais arestas de corte, sendo que a cada revolução produz uma série de cavacos (KÖNIG; KLOCKE, 1997; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999). Tem como característica o corte interrompido, onde se acentuam as solicitações térmicas e mecânicas alternantes. Logo, o processo deve ser direcionado a suportar grandes variações de cargas estáticas e dinâmicas (PAUCKSH et al., 2008).

A ferramenta utilizada nesta operação é denominada fresa, provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno um eixo. Podem ser de diversas formas construtivas e geometrias, sendo as mais comuns as de incerto intercambiáveis e inteiriças (STEMMER, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

2.1.1 Fresamento de topo

O processo de fresamento de topo é amplamente utilizado na confecção de moldes e matrizes para executar operações de facear, ranhurar, rebaixar, executar rasgos e contornos de todos os tipos, tanto para operações de desbaste devido a sua alta taxa de remoção de cavaco, quanto para operações de acabamento (RODRÍGUEZ, 2009).

As fresas possuem inúmeras formas construtivas, conforme a necessidade de cada operação. Alguns exemplos são demonstrados na Figura 1, onde se encontram fresas inteiriças de aço rápido ou metal-duro, fresas de incerto intercambiáveis e os seus respectivos suportes.

Fresas inteiriças podem ser fabricadas através de um substrato de metal-duro obtido pela tecnologia em metalurgia do pó e usinadas, retificadas e temperadas para atingir as características desejadas. O metal-duro é um produto da metalurgia do pó, onde partículas duras de carboneto de tungstênio são sinterizadas com metais da família do ferro (ferro, cobalto, níquel), formando um substrato de alta dureza e elevada resistência a compressão.



Figura 1 – Modelos convencionais de fresa de topo

Fonte: adaptado de Sandvik Coromant (2020).

Após as demais etapas de fabricação, o metal-duro adquire propriedades essenciais para a usinagem tais como, dureza elevada em altas temperaturas, tenacidade (resistência ao choque) e resistência ao desgaste, assim atendendo as necessidades exigidas para as ferramentas de usinagem (STEMMER, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999; MACHADO et al., 2009).

No fresamento de topo a superfície usinada é resultado da ação conjunta dos gumes localizados na periferia e face frontal da fresa. O resultado desta operação é uma superfície plana, sem qualquer relação com a geometria das arestas cortantes (STEMMER, 2005; MACHADO et al., 2009). Também chamado de fresamento frontal, o fresamento de topo é a operação na qual os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da fresa é perpendicular a superfície usinada (FERRARESI, 1970; STEMMER, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

A fresagem pode ser diferenciada pela cinemática de interação entre a peça e a ferramenta, podendo ser concordante ou discordante. No fresamento discordante, os movimentos de corte e de avanço têm, em média, sentidos opostos. Já no fresamento concordante, os movimentos de corte e de avanço têm, em média, o mesmo sentido (STEMMER, 1995). Caso o eixo da fresa interceptar o material da peça ocorrerá simultaneamente a fresagem discordante e concordante, conforme ilustrado na Figura 2. Segundo König e Klocke (1997), a fresagem concordante tem vantagens sobre a discordante tais como: a força de corte tende a movimentar a peça contra a mesa da fresadora gerando maior rigidez no processo de corte; maior vida da ferramenta devido a uma redução no perímetro de corte do gume na ordem de 3%; e uma melhor qualidade superficial.

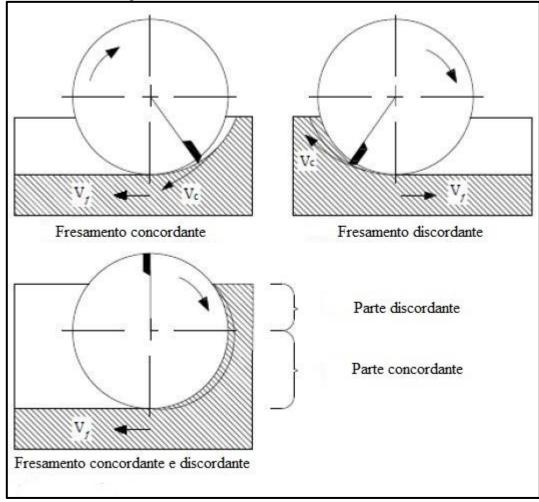


Figura 2 – Fresamento concordante e discordante

Fonte: adaptado de König e Klocke (1997).

2.2 GEOMETRIA DA FERRAMENTA

2.2.1 Macrogeometria fresa de topo

Segundo Stemmer (2005), na maioria dos processos de fabricação são aplicadas ferramentas de corte com geometria definida. Logo, a indústria de fabricação objetiva o melhor desempenho levando em consideração a geometria da ferramenta e sua influência nas diferentes condições de uso que podem ser submetidas (REBEYKA, 2016).

Analisando sua forma construtiva, as fresas de topo tem elementos principais que as caracterizam conforme número e tipos de gumes, ângulos principais, dimensional e quebra cavaco. Para fresas inteiriças, quanto menor o número de arestas, menor será à rigidez devido à diminuição do núcleo da ferramenta e maior será a capacidade de alojamento do cavaco nos canais de saída. Fresas com maior área para escoamento do cavaco são utilizadas em

operações de desbaste e fresas com maior número de gumes são utilizadas em operações de acabamento, devido a sua maior rigidez (REBEYKA, 2016; STEMMER, 2005; MACHADO et al., 2009).

A Figura 3 demonstra a macrogeometria de uma fresa de topo reto com canais helicoidais e seus principais ângulos. O ângulo de folga ou incidência (α_0) tem como objetivo evitar o atrito entre a superfície de folga e a superfície da peça durante a usinagem. Comumente variando entre 5° e 20°, sendo que, valores muito baixos dificultam a penetração da cunha na peça aumentando o desgaste e valores muito altos aumentam a fragilidade da cunha. O ângulo de saída (γ₀) influência diretamente na força e potência necessária para o corte. Frequentemente, variando entre -8 a 20° , ângulos negativos de (γ_0) são normalmente empregados em materiais de difícil usinabilidade ou corte interrompido, enquanto que, ângulos positivos de (γ_0) são recomendados para materiais dúcteis devido ao fato de diminuírem a área de adesão do cavaco com a superfície da ferramenta. O ângulo (β₀) identifica a cunha de corte que compreende os ângulos entre face e flanco, sendo esse inversamente proporcional ao ângulo de saída (γ_0). Ângulos de (β_0 =90°) resultam em maior resistência da cunha de corte. O quebra cavacos é uma modificação na macrogeometria da ferramenta onde sua principal função é aumentar a tensão na superfície do cavaco forçando a sua fratura periódica (REBEYKA, 2016; STEMMER, 2005; MACHADO et al., 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

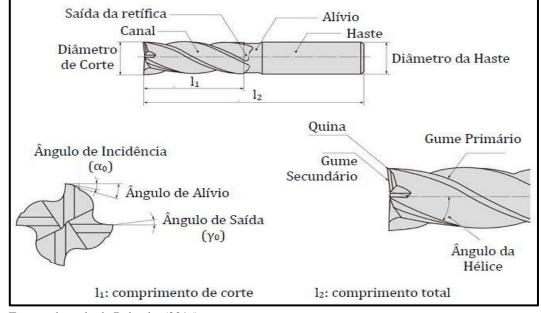


Figura 3 – Terminologia cunha de corte

Fonte: adaptado de Rebeyka (2016).

2.2.2 Mesogeometria e microgeometria do gume

No processo de usinagem, os parâmetros de entrada e saída são afetados diretamente pela geometria da ferramenta de corte. Diversos fatores devem ser levados em consideração para nortear a escolha correta da geometria do gume segundo sua aplicação, tais como: tipo de usinagem a ser realizada; parâmetros de processo; material da peça a ser usinada; material, macrogeometria e tratamento da ferramenta de corte (RODRÍGUEZ, 2009).

Segundo Rech (2006) e Rodríguez (2009), é possível subdividir a geometria do gume em macro, meso e microgeometria. A macrogeometria trata dos ângulos principais da ferramenta, quebra cavacos, entre outros já mencionados no capítulo anterior. A mesogeometria tem ligação direta com o tratamento do gume, por definir os contornos correspondentes à superfície convexa do gume. A microgeometria considera a microtopografia da aresta e da superfície.

O fator de forma (K) e o raio do gume são parâmetros utilizados para caracterizar a mesogeometria da ferramenta. O fator é ilustrado na Figura 4 e indica à simetria do gume e os parâmetros $S\alpha$ e $S\gamma$ representam a distância tangencial do raio do gume até a intersecção teórica da face com o flanco da ferramenta (GONÇALVES, 2019; RODRÍGUEZ, 2009).

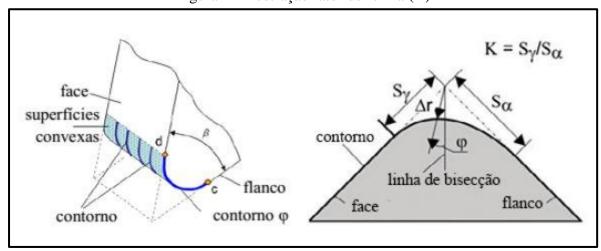


Figura 4 – Ilustração fator de forma (K)

Fonte: adaptado de Rodríguez (2009), Gonçalves (2019).

A Figura 5 mostra exemplos de arredondamento para a aresta de corte, formados pela combinação de parâmetros que resultam em diferentes valores de (K). Existem três formas básicas: perfil com raio único; perfil em cascata com dois raios; chanfros mais arredondamentos. Também são possíveis outras combinações (RODRÍGUEZ, 2009).

Simétrico K > 1 K < 1 $A_{\gamma} \qquad S_{\gamma} \qquad A_{\gamma} \qquad S_{\gamma} \qquad A_{\gamma} \qquad S_{\alpha} \qquad S_{\alpha} \qquad A_{\alpha} \qquad S_{\alpha} \qquad S_$

Figura 5 – Exemplo de diferentes raios de gume

Fonte: adaptado de Rodríguez (2009); Tikal (2009).

2.3 PREPARAÇÃO DO GUME

O meio industrial tem gradativamente aumentado a exigência para que os processos de usinagem garantam melhor produtividade, confiabilidade e menores custos de produção em decorrência da demanda e competitividade do mercado. Os processos de preparação da microgeometria do gume têm ganhado maior importância neste contexto contribuindo diretamente para atender esses requisitos (DENKENA; KOEHLER; REHE, 2012).

O objetivo da preparação de gume é remover material sistematicamente, atuando diretamente na geração da geometria do gume. O acabamento pode modificar a microtopografia e alterar a rugosidade e textura das superfícies da ferramenta nas proximidades do gume (RODRÍGUEZ, 2009).

Existem três mecanismos para realização do tratamento do gume: mecânicos; térmicos; e químicos. O mecanismo mais utilizado atualmente é o processo que envolve energia mecânica. Demonstrado na Figura 6, dentre os tipos de preparação, a usinagem com jato microabrasivos é a mais utilizada, seguido pelos processos de polimento, que se dividem em magnéticos, mecânicos, termoquímicos, usinagem fluxo abrasivo, acabamento por arraste e usinagem por eletroerosão (RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA; KOEHLER; REHE, 2012; RECH, 2006; BIERMANN; WOLF; ASSMUTH, 2012).

A classificação dos gumes pode ser caracterizada pelo raio após a preparação, onde resulta em três grupos básicos. Inicialmente as ferramentas afiadas através do processo de retificação, apresentam normalmente raios na faixa de 5 μm. Posteriormente as ferramentas preparadas através do acabamento por arraste e jatos abrasivos, possuem raio na faixa de 5 μm a 20 μm. Acima de 20 μm, estão as arestas tratadas por processos de escovamento (FULEMOVÁ; JANDA, 2014; FULEMOVÁ; REHOR, 2015; PAUCKSH et al., 2008; SOMMER, 2013).

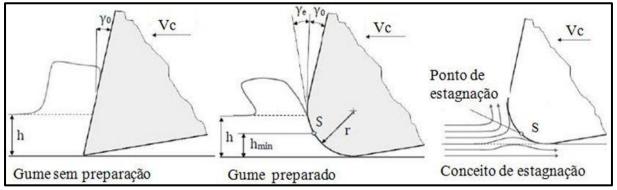
Figura 6 – Processo de preparação do gume



Fonte: adaptado de Rodríguez (2009).

A definição do conceito de mecânica do corte assume que, em um gume afiado, toda a porção do cavaco gerado escoa pela face de cunha de corte (RODRÍGUEZ, 2009). Contudo o tratamento do gume modifica a interação entre a ferramenta a peça e o cavaco. A partir do arredondamento da aresta, ocorrem alterações na força de corte, temperatura, formação do cavaco, integridade superficial da superfície usinada, desgaste e vida útil da ferramenta (RODRÍGUEZ, 2009). A Figura 7 ilustra a maneira como o cavaco é formado e escoa em um gume sem preparação e um gume arredondado.

Figura 7 – Principio de escoamento do cavaco em um gume preparado



Fonte: adaptado de Rodríguez (2009).

Com a preparação da ponta ocorre uma mudança no ângulo efetivo de saída (γ_e), devido à alteração do contato gerado pela nova microgeometria do gume. O ponto S é chamado de ponto de estagnação, ou separação, onde a porção de material acima dele efetivamente gera o cavaco, enquanto que a parte abaixo do ponto S (h_{min}) não gera cavaco, mas é pressionada contra a superfície da peça. A zona de estagnação pode ser visualizada a

direita da figura 7, onde fica evidente o ponto de separação que gera o cavaco e a zona de deformação plástica que gera a superfície recém usinada. Para raios de gume iguais a (h_{min}), o ângulo efetivo de saída se mantém negativo, independente do ângulo de saída nominal (γ) ser positivo, negativo ou neutro (RODRÍGUEZ, 2009; BERGMANN et al., 2019). Ainda segundo Rodríguez (2009), para ferramentas com arredondamento da ponta, ocorre um aumento da energia necessária para a remoção do cavaco devido à maior zona de deformação plástica presente no processo de corte.

Conforme a Figura 8, outro fator afetado é a temperatura de formação do cavaco, sendo que, a temperatura máxima de corte é deslocada da face de corte para a face de folga da ferramenta, contribuindo para que uma porção maior do gume receba o calor gerado no processo. (RODRÍGUEZ, 2009; SILVA et al., 2019; BERGMANN et al., 2019).

Raio 0.05 mm Raio 0,30 mm

Figura 8 – Distribuição de temperaturas com diferentes raios do gume

Fonte: adaptado de Rodríguez (2009).

Os defeitos do gume proveniente dos processos de fabricação utilizados nas ferramentas são visualizados na forma de: rebarbas; microlascamento; ranhuras; rugosidade após a retificação; saliências após sinterização e fissuras ao longo da borda da ferramenta. Estes defeitos causam aumento do risco prematuro de falhas, devido à concentração de tensão no gume, instabilidade da borda e redução da vida útil da ferramenta (KLOCKE, 2018; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Posteriormente a preparação, os defeitos de fabricação são atenuados ou removidos contribuindo para uma superfície mais homogenia do gume e melhorando sua estabilidade contra as variáveis térmicas e mecânicas presentes no processo de usinagem. Consequentemente a vida útil da ferramenta é prolongada, resultado de um processo com melhor qualidade e confiabilidade (KÖNIG; KLOCKE, 1997; RODRÍGUEZ, 2009; BIERMANN; WOLF; ASSMUTH, 2012).

Gonçalves (2019) avaliou a influência da microgeometria do gume e do revestimento de ferramentas de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 com 55 HRC. Segundo o

autor, a ferramenta com revestimento e preparação do gume alcançou um resultado 33% superior que uma ferramenta revestida sem preparação da ponta.

Denkena, Koehler e Rehe (2012), desenvolveram um estudo sobre a influência da microgeometria no desgaste da ferramenta e na qualidade superficial atuando no fresamento do aço cromo-molibdênio 42CrMo₄. Concluíram que as microgeometrias personalizadas contribuem positivamente para a vida da ferramenta, embora a força de corte tenha aumentado, os resultados foram superiores em comparação com ferramentas sem tratamento do gume. O estudo demonstrou que o mecanismo de desgaste predominante nas ferramentas preparadas foi a abrasão gerando o desgaste de flanco, porém, as fresas sem preparação sofreram maior influência da adesão resultando em uma maior incidência de microlascamentos.

Zeilmann et al. (2013), avaliou o desempenho de fresas de aço-rápido após tratamento superficial na usinagem do aço AISI P20 com 36 HRC, em relação à vida útil da ferramenta e qualidade superficial. Segundo os autores, as ferramentas apresentaram uma vida superior em 50% se comparadas as não tratadas. Os mecanismos de desgaste predominantes foram adesão e abrasão em todas as fresas. O processo de usinagem com ferramentas preparadas se mostrou mais estável o que corrobora com o aumento significativo da vida útil da ferramenta testada. A qualidade superficial das amostras usinadas não apresentou diferença significativa com o uso de ferramentas tratadas. Os autores descrevem que no final da vida, a ferramenta preparada, possivelmente ocorreu um aumento no raio do gume devido ao desgaste a valores próximo ao valor de avanço, resultando em grande aumento dos esforços térmicos e mecânicos predominantes na usinagem.

Vopát et al. (2020) avaliou o desempenho de pastilhas de metal-duro no torneamento do aço inoxidável austenítico (AISI 321). Os incertos receberam preparação da ponta com dois métodos diferentes, sendo eles o microjateamento e o escovamento com cerdas abasivas variando o raio da ponta com 3 valores distintos. Também investigou a adesão do revestimento após cada tipo de preparação entre outros parâmetros. Quanto a vida útil da ferramenta, o autor concluiu que raios menores, na casa de 20 µm, resultaram em 10% a mais de vida útil em relação à ferramenta similar tratada com o microjateamento de mesmo raio. Quanto à variação do raio da ponta foi possível constatar que ferramentas com 60 µm tiveram um desempenho 70% inferior se comparadas com as de menor raio e ainda um aumento significativo da microdureza superficial na peça, indicando um grande aumento dos esforços térmicos e mecânicos predominantes na usinagem.

De maneira geral, a preparação do gume pode trazer benefícios para os processos de usinagem em maior ou menor escala. Com o passar dos anos, o aumento na quantidade de estudos e novas tecnologias para alteração do gume, acabam convergindo em ferramentas mais eficientes e estáveis disponíveis no mercado. Entretanto, o melhor desempenho de uma ferramenta será alcançado somente quando a mesma for preparada para um conjunto específico de parâmetros correlacionados a um determinado material (BERGMANN et al., 2019; RODRÍGUEZ, 2009).

2.3.1 Preparação por escovamento

O processo utiliza a usinagem por geometria de corte não definida e é amplamente utilizado na indústria para rebarbação de componentes usinados e acabamento superficial de peças por possuir características de baixo custo e robustez (BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012).

Também é recomendado o seu uso em aplicações que se deseja um raio específico do gume na superfície do material que inicialmente está no estado afiado. O resultado é a alteração, de modo controlado, da micro e mesogeometria da ferramenta por criar um novo perfil na ponta da cunha de corte e obter uma superfície convexa que faz a transição entre as faces de folga e de saída da cunha (BERGMANN et al., 2019; RODRÍGUEZ, 2009; KÖNIG; KLOCKE, 1997; DENKENA; BIERMANN, 2014). As escovas têm forma construtiva circunferencial, compreendidas por um núcleo que servirá para acoplar a escova ao equipamento que gera a rotação, e os filamentos que podem ser de aço, fibra natural ou nylon. Quando utilizadas para acabamento superficial ou rebarbação, podem ser fixadas no mesmo plano da superfície ou perpendicular a face de preparação (RODRÍGUEZ, 2009).

2.3.1.1 Escovamento com cerdas abrasivas

O processo de escovamento com cerdas abrasivas também é conhecido como escovamento por filamentos de nylon abrasivos (FAN). O mecanismo através do qual os FAN efetuam a remoção de material é a abrasão. Durante o uso, novos grãos abrasivos afiados são constantemente expostos, consequentemente o ciclo de rotações da escova gera a remoção de material desejado na superfície e o desgaste dos filamentos. Isto contribui para uma eficiente escovação durante a vida da escova. (RODRÍGUEZ, 2009; SIT, 2019).

A obtenção dos FAN é feita pelo processo de extrusão, que depois de finalizado, resulta em filamentos com 30 a 40% do seu volume composto por grãos abrasivos. Frequentemente os grãos mais utilizados são o carboneto de silício (SiC) ou óxido de alumínio (Al₂O₃). A classificação dos filamentos abrasivos pode ser especificada pela granulometria, ou tamanho de grão. Outras características são importantes como o grau de dispersão de tamanhos de grão e a probabilidade de aglomeração dos grãos, utilizando a técnica de espalhamento de luz dinâmico, às vezes chamado de espalhamento de luz quase elástico (BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012; OVERHOLSER; STANGO; FOURNELLE, 2003; RODRÍGUEZ, 2009; MATHAI; MELKOTE, 2012).

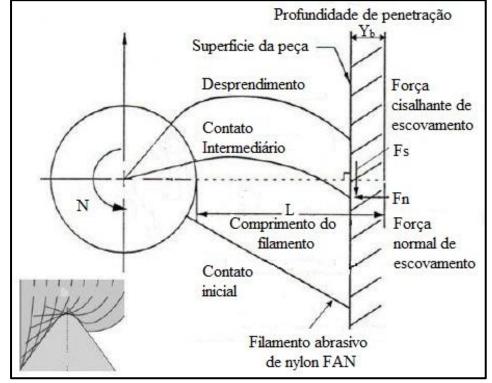


Figura 9 – Cinemática no processo de escovamento com cerdas abrasivas

Fonte: adaptado de Overholser, Stango e Fournelle, (2003); Rodríguez (2009).

A cinemática de interação entre o FAN e a superfície a ser escovada é retratada na Figura 9. O contato entre o filamento e a superfície plana, é realizado de modo ortogonal (orientação perpendicular), em três diferentes posições: local inicial, intermediário e de desprendimento. A força total de usinagem exercida pela ponta do filamento na superfície da peça pode ser decomposta em suas componentes: normal (Fn) e cisalhante (Fs). O contato dos filamentos com a geometria do gume também é exemplificado, à esquerda onde A representa

as cerdas e B o gume da ferramenta, mostrando como se dá a deformação das cerdas (OVERHOLSER; STANGO; FOURNELLE, 2003; RODRÍGUEZ, 2009).

A temperatura durante o processo de escovamento é um fator que impõe restrições quanto à utilização das escovas com filamentos de nylon. Caso os filamentos fiquem expostos a temperaturas correspondentes à fusão do nylon, poderá ocorrer o derretimento e adesão do substrato na superfície a ser escovada. Uma das maneiras de controlar a temperatura é o controle da velocidade tangencial da escova, que não deve ultrapassar os 13,2 m/s, evitando o ponto de fusão dos filamentos que fica entre 210 a 225 °C. Para grandes produções, aconselha-se a utilização de óleos refrigerantes na umidificação, desde que, não ocorra degradação dos filamentos (BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012; KÖNIG; KLOCKE, 1997; STANGO, 1999).

Atuando na preparação do gume, o processo pode gerar microgeometrias com raios definidos de 5 a 20 µm e melhorar a qualidade superficial das superfícies de face e flanco da ferramenta. Este método não é afetado pela geometria da ferramenta podendo esta ser quadrada, triangular, arredondada ou ondulada. (TIKAL, 2009; RODRÍGUEZ, 2009).

Denkena, Krödel e Hein (2019), analisaram a influência das vaiáveis de configuração no processo de polimento com escovas de cerdas abrasivas radiais dotadas de diamantes. Concluíram que arredondamentos simétricos e assimétricos são possíveis de produzir com alta reprodutibilidade em ferramentas de geometria complexa como as fresas. Foi constatado que todas as configurações de processo examinadas têm influência na formação do raio de ponta em maior ou menor grau. Paralelamente a isso, uma criteriosa análise e caracterização do filamento permitem estimar o desgaste durante o polimento, aumentando a compreensão sobre a taxa com que os novos grãos abrasivos são expostos.

2.3.1.2 Escovamento com esponjas abrasivas

O processo de tratamento do gume por escovamento com a utilização de esponjas abrasivas ou cerdas abrasivas é semelhante, entretanto, podem ser diferenciados pela orientação dos filamentos em contato com a superfície (OST, 2016).

Esponjas abrasivas são geralmente encontradas no mercado em forma de folhas de acabamento superficial constituídas de uma manta não tecida de fibra sintética de nylon, sendo que, o material abrasivo é fixado através de uma resina resistente a água. O processo de fabricação das esponjas é constituído inicialmente pela formação da malha ou emaranhado, ocorrendo posteriormente à deposição do material abrasivo e a resina de fixação. A

classificação das esponjas é feita pela granulometria e o abrasivo presente nas fibras. Quanto ao tipo de abrasivo, os grãos mais utilizados são o carboneto de silício (SiC) ou óxido de alumínio (Al₂O₃) (3M, 2020; SIT, 2019).

Segundo a Figura 10, é perceptível a orientação randômica das fibras que constituem a esponja.

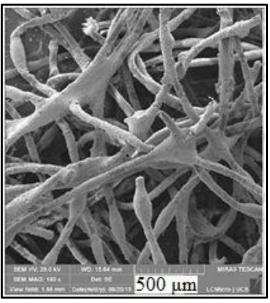


Figura 10 – Microscopia de uma esponja abrasiva

Fonte: adaptado de Ost (2016).

2.4 USINABILIDADE

Denomina-se usinabilidade, o grau de dificuldade que o material apresenta quando usinado ou trabalhado com ferramentas de corte. O conceito engloba o conjunto de propriedades presentes nos seus componentes principais: a peça ou material; o equipamento e a ferramenta de corte; os parâmetros de corte. Toda a comunidade que se envolve na produção de peças por meio da remoção do cavaco tem grande interesse em estabelecer métodos de ensaio que possam determinar a usinabilidade de cada material (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

A usinabilidade é afetada pelas propriedades físicas, químicas e mecânicas do material, sendo as mais importantes a dureza, resistência a tração, composição química e afinidade química com a ferramenta. A ferramenta influi através da geometria, material e acabamento do gume. As variáveis de processo interferem na usinabilidade com os parâmetros de corte, tais como: velocidade de corte, avanço, profundidade. O equipamento no

qual o material será usinado contribui com características como: a potência e força de corte disponível na ponta da ferramenta; rigidez do conjunto ferramenta e porta ferramenta; absorção de vibrações; gama de velocidades e avanço (STEMMER, 1995).

Conforme Ferraresi (1970), o conceito de usinabilidade, embora muito estudado e discutido, é um tema complexo e difícil de ser totalmente compreendido. Materiais diferentes submetidos ao mesmo processo de usinagem geram resultados distintos e acrescentam informações que contribuem para a dificuldade da padronização no conceito de usinabilidade.

Entretanto foram desenvolvidos critérios fundamentais para a avaliação da usinabilidade de um material. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999), König e Klocke (1997), a vida da ferramenta, a qualidade superficial da peça e da superfície, formação do cavaco e forças de usinagem são critérios de usinabilidade. Dentre eles, a formação do cavaco é o único que não pode ser avaliado quantitativamente.

Com o passar dos anos o conceito de usinabilidade tem sido utilizado por diversos autores para validar os avanços gerados através dos estudos e pesquisas desenvolvidos com ferramentas de corte. No presente trabalho, os critérios de vida útil e qualidade superficial serão empregados para avaliar a preparação do gume pelo processo de escovamento. (DENKENA; KOEHLER; REHE, 2012)

2.4.1 Mecanismos e tipos de desgaste

No processo de usinagem é normal que todos os tipos de desgaste estejam presentes com maior ou menor influência. As formas de desgastes observadas são geradas pelos mecanismos de desgastes presentes em cada operação. A grande variedade de mecanismos relatados pela literatura torna seu entendimento complexo, principalmente pela falta de consenso em relacionar o tipo de desgaste com o mecanismo atuante (MACHADO et al., 2009). Entretanto, é possível citar como principais mecanismos responsáveis pelo desgaste das ferramentas de corte a abrasão, oxidação, adesão e difusão (STEMMER, 2005).

A abrasão é uma das principais causadoras do desgaste nas ferramentas de corte. O mecanismo gera tanto o desgaste frontal, também chamado desgaste de flanco, como o desgaste por cratera. O desgaste de flanco é predominante, pois, a superfície de folga atrita com um elemento rígido que é a peça e a superfície de saída sofre abrasão por um elemento flexível que é o cavaco. Altas temperaturas de corte e a presença de particulado duro na composição do material também aumentam o desgaste por abrasão. Uma das propriedades que o processo de usinagem exige das ferramentas de corte é a dureza a quente, uma vez que,

sua resistência ao desgaste abrasivo é proporcional a esta característica (MACHADO et al., 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999; STEMMER, 2005; FERRARESI, 1970).

O mecanismo de adesão acontece quando a interface peça - ferramenta é submetida a condições de baixas velocidades de corte, baixas temperaturas e carga moderada. A adesão forma um extrato metálico, resultante do contato entre os dois metais, ocorrendo posteriormente uma ruptura que desencadeia o deslocamento das partículas de um metal para o outro, ao invés da remoção de material esperada. A adesão é o mecanismo atuante no desgaste de entalhe e pode estar presente na formação de aresta postiça. O fresamento tem a característica de corte interrompido, que somados com a profundidade de corte irregular e a falta de rigidez, contribuem para o fluxo irregular do cavaco promovendo a adesão. Entretanto, existem maneiras de evitar a adesão com a aplicação de revestimentos com baixo coeficiente de atrito nas ferramentas e o uso de fluidos de corte com características lubrirefrigerantes personalizadas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999; KÖNIG; KLOCKE, 1997).

A condição de altas temperaturas na zona de corte gera o mecanismo da difusão caracterizado pela transferência de átomos de um metal para o outro. A afinidade físico-química dos metais e a duração do contato também são fatores importantes para o mecanismo. Durante a difusão ocorre uma reação química entre o metal da peça e o da ferramenta, que no caso do metal-duro, provoca a formação de carbonetos complexos que são menos resistentes e consequentemente são removidos pela abrasão. O desgaste de cratera está relacionado com a difusão devido às condições necessárias ocorrerem na superfície de saída da ferramenta. Os recobrimentos cerâmicos são indicados para reduzir a difusão por diminuírem a afinidade físico-química dos metais em contato (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999; KÖNIG; KLOCKE, 1997).

A oxidação é formada por altas temperaturas de corte, presença do ar contido no ambiente e a água presente nos fluídos lubrirefrigerantes (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999). Segundo Machado et al. (2009), o mecanismo pode ser notado pela coloração ao longo do cavaco, onde nas bordas se encontram tons mais escuros e no centro tons mais claros, ficando evidente o maior encruamento e altas temperaturas nas bordas do cavaco. Em outras palavras, o desgaste por oxidação ocorre normalmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta sendo este afetado por altas temperaturas e a presença do ar. O desgaste de entalhe está relacionado com o mecanismo de oxidação, que frequentemente, ocorre em materiais com alto índice de encruamento e promove diferenças significativas de temperatura das bordas para o centro do cavaco.

2.4.1.1 Medição dos desgastes da ferramenta

Na usinagem, mesmo que todos os fatores influenciadores do desgaste da ferramenta estejam completamente personalizados para o tipo de operação garantindo o melhor rendimento possível, ocorrerá o desgaste. A norma ISO 3685 define desgaste em ferramentas como a mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. Podem ser divididos pela sua localização na ferramenta: os desgastes ocorridos no flanco e os presentes na face (STEMMER, 2005; FERRARESI, 1970; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

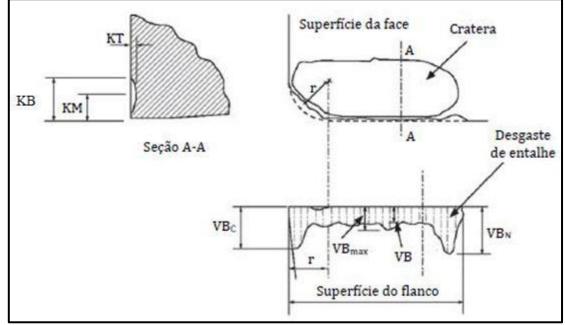


Figura 11 – Representação do desgaste em ferramentas de corte

Fonte: adaptado de Machado et al. (2009).

Ilustrado na Figura 11, os tipos de desgaste e sua localização na cunha de corte podem ser compreendidos. Na face da ferramenta está localizado o desgaste de cratera mensurado pela sua profundidade (KT), largura da cratera (KB) e a distância entre o centro da cratera e a aresta de corte (KM). Na superfície de folga ou flanco mede-se a largura do desgaste de flanco (VB), sendo este um valor médio do desgaste na superfície de flanco, e a largura máxima do desgaste de flanco (VB_{max}). O desgaste de entalhe (VB_n) e (VB_c) estão presentes na superfície de folga (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Normalmente, as ferramentas são reafiadas os substituías antes que os desgastes mencionados assumam proporções que possam causar alterações na cinemática do processo de usinagem. Caso ocorram grandes variações de cargas térmicas e mecânicas a cunha de

corte pode sofrer desgastes excessivos e avarias de nível catastrófico (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Conforme estudos apresentados por Gonçalves (2019), Ost (2016) e Buckell (2019), o uso de ferramentas com polimento do gume no fresamento de topo resulta na diminuição do desgaste por microlascamento devido à melhor suavização das arestas. Ainda segundo os autores, o desgaste predominante foi o de flanco confirmando a melhor estabilidade do gume durante a usinagem.

2.4.1.2 Vida da ferramenta de corte

Utilizando os critérios de desgaste da ferramenta é possível determinar o tempo efetivo que uma aresta de corte pode trabalhar antes que o processo de usinagem seja colocado em risco. Com a adoção de um critério é possível determinar o fim da vida da ferramenta e encontrar a melhor condição econômica do processo (STEMMER, 1995).

A vida de uma ferramenta de corte pode ser expressa por uma curva de desgaste padrão dividia em três estágios, ilustrada na Figura 12.

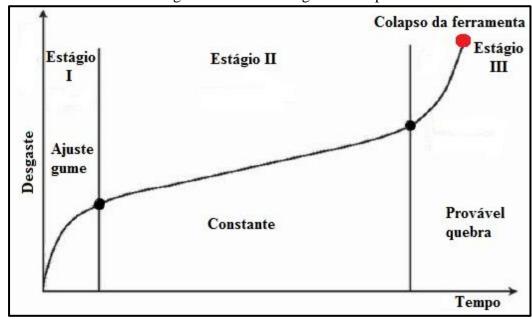


Figura 12 – Curva desgaste x tempo

Fonte: adaptado de Machado et al. (2009).

No I estágio, ocorre uma acomodação da cunha de corte ao processo. Nota - se inicialmente um desgaste acelerado devido às questões tribológicas envolvidas nesta fase, contudo, o desgaste diminui sua taxa de crescimento gradualmente até a fronteira com o

estágio II. No estágio II, a cunha de corte já está adequada ao processo e os mecanismos de desgaste operam a uma taxa constante levando a curva de desgaste a assumir uma taxa de crescimento contínuo. A inclinação constante da curva caracteriza o momento efetivo no qual a ferramenta está removendo o material desejado. O estágio III apresenta novamente um grande aumento da taxa de desgaste, sendo que, neste ponto as tensões e temperaturas atuantes na ferramenta atingem níveis elevados com a continuidade do processo e a ferramenta está sujeita a quebra num breve período de tempo. Recomenda-se que o estágio III não seja atingido por conta de sua imprevisibilidade em estabelecer o ponto de quebra da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

No fresamento com ferramenta em metal-duro o critério controlado é o (VB) não sendo indicado que ultrapasse valores na casa de 0,3 mm para desbaste e 0,2 mm para acabamento evitando problemas de qualidade superficial nesta operação. Para potencializar a vida da ferramenta é possível a adoção de um sistema de monitoramento para determinar, com exatidão, o melhor momento para troca ou reafiação do gume. Sistemas de monitoramento são normalmente utilizados em indústrias de grande porte ou na usinagem de componentes de alto valor ou grande responsabilidade mecânica (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999; MACHADO et al., (2009).

2.5 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície usinada. Durante o processo de usinagem ocorrem deformações plásticas, geração de calor, tensões residuais e outros fatores que têm efeito direto na alteração da superfície trabalhada. Tais alterações podem ser decisivas para a utilização da peça ou componente a ser fabricado, sendo de grande importância o seu entendimento e controle (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

A formação de superfícies está diretamente ligada com o princípio de formação do cavaco, este realizado através do contato ferramenta e a peça. Conforme ocorre a penetração da ferramenta na peça, porções do material são recalcadas contra a face de saída da ferramenta. O material inicialmente começa a sofrer deformação elástica, logo após, sofre deformação plástica até que o estado de tensões cause a ruptura que normalmente se dá por cisalhamento. É um fenômeno periódico, pois, para a remoção de cada porção de material existe um ciclo que compreende uma alternância de fases de remoção e escorregamento do cavaco (FERRARESI, 1970; MACHADO et al., 2009).

Conforme König e Klocke (1997), a superfície submetida às alterações, pode ser classificada em dois grupos: alterações superficiais e subsuperficiais. Alterações na superfície compreendem as ondulações, falhas e rugosidade. São consideradas alterações subsuperfíciais as tensões residuais e microdureza da camada afetada entre outros fatores.

Ondulações podem ser causadas por vibrações, flexões da ferramenta, temperatura de corte ou erros de fixação da peça. Caracterizam-se por irregularidades superficiais ou erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades denominadas rugosidades. Falhas são interrupções na topografia de uma superfície podendo ser causadas por defeitos inerentes ao material da peça como inclusões, trincas, bolhas ou podem surgir durante o processo de corte. Rugosidade é caracterizada por erros microgeométricos ocorridos durante do processo de corte. Ao contrário das ondulações e falhas, rugosidade não é considerada um erro e sim um parâmetro que pode ser especificado conforme aplicação da superfície usinada (STEMMER, 1995).

A integridade é afetada por diversos fatores, entre eles, os parâmetros utilizados durante a usinagem. Uma baixa velocidade de corte somada a um grande avanço pode proporcionar a formação de aresta postiça de corte (APC) que é cisalhada e adere à superfície usinada piorando sua qualidade superficial. A altura das ondulações e a possibilidade de flexão da ferramenta ou da peça têm ligação direta com o parâmetro de profundidade de corte que é proporcional as forças de usinagem (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

A geometria do gume tem grande influência na qualidade superficial. O raio da ponta, quando bem dimensionado pode diminuir as marcas de avanço contribuindo para a melhora da integridade. Outros parâmetros da geometria da aresta também têm influência como o ângulo de folga (α_0) que pode reduzir os efeitos do APC, o ângulo de saída (γ_0) pode influenciar no escoamento lateral do cavaco aumentando a deformação plástica diminuindo as rebarbas e sulcos na peça. Fatores como, rigidez da máquina e porta ferramentas, absorção de vibrações pelo equipamento, composição química, dureza e microestrutura do material afetam a integridade superficial (MACHADO et al., 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Alterações das camadas abaixo da superfície de serviço são notadas no fresamento com a formação de tensões residuais. O processo induz normalmente a deformações plásticas que levam as tensões a serem de natureza compressiva, porém, com o aumento da velocidade de corte a intensidade das tensões e a camada afetada tendem a aumentar. Tensões de natureza compressiva são consideradas benéficas devido a aumentar a resistência contra a fadiga do material usinado. A elevação de microdureza no processo pode ocorrer pelo choque térmico

na superfície, evidenciado pelo aumento de temperatura seguido de um resfriamento repentino (SHAW, 1997; MACHADO et al., 2009).

2.5.1 Textura

O termo textura tem sido utilizado para descrever a qualidade geral da superfície de uma peça, não levando em consideração as propriedades relativas à integridade superficial. Também pode ser descrita como as características macrogeométricas que podem ser visualizadas a olho nu, tais como, raias, falhas, crateras e trincas (BET, 1999).

Uma superfície usinada é composta por diversos componentes de textura, gerados durante o processo de fabricação. Os componentes se sobrepõem e formam um padrão complexo que caracteriza o perfil da peça, destacando-se entre eles a ondulação e rugosidade (MACHADO et al., 2009; BET, 1999).

A quantificação da textura em superfícies pode ser feita através de sondas baseadas em apalpamento mecânico ou apalpamento óptico, possibilita a medição e avaliação de superfícies finamente acabadas oriundas de processos de fabricação mais refinados melhorando o desempenho de peças ou componentes que tem elevado nível de exigência nesta área (BET, 1999).

2.5.2 Rugosidade

Rugosidade é o conjunto de erros microgeométricos ou finas irregularidades causadas pelos processos de fabricação e caracterizadas por picos e vales na topografia da superfície. Rugosidade é um parâmetro incluso no projeto de peças conforme a atuação da superfície podendo ser medido e controlado para melhor desempenho do componente (MACHADO et al., 2009).

As avaliações de rugosidades são realizadas com o instrumento chamado rugosímetro que contém um apalpador mecânico com uma ponta que percorre o comprimento de amostragem. As técnicas de medição são regidas por normas de organizações como ISO, DIN, JIS. Conforme, Machado et al. (2009) e Oliveira (2006), a rugosidade pode ser medida por diversos parâmetros.

O parâmetro (R_a) é o mais utilizado na indústria. Chamado de desvio aritmético médio representa a média dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de

amostragem. A Figura 13 ilustra o padrão de rugosidade, o parâmetro (R_a) e como ele é calculado.

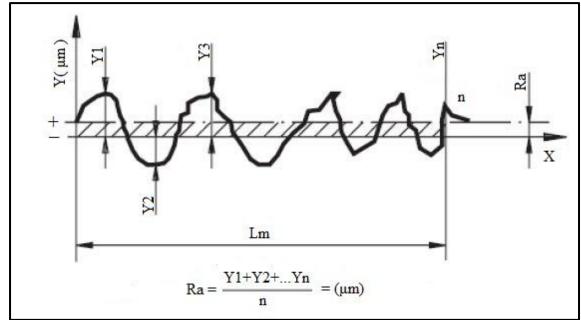


Figura 13 – Perfil de rugosidades

Fonte: adaptado de Oliveira (2006).

O parâmetro (R_y) resulta na altura total do perfil, definido pela soma da altura do maior pico do perfil e da maior profundidade do vale do perfil presente no comprimento de amostragem.

O desvio médio quadrático (R_q) compreende a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.

O desvio (R_z) corresponde à soma da altura máxima dos picos e a maior profundidade dos vales no comprimento de amostragem. Outros parâmetros podem ser obtidos para representar a assimetria ou achatamento do perfil.

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda os principais tópicos utilizados no desenvolvimento da metodologia empregada nos ensaios experimentais. Paralelamente apresenta o planejamento, equipamentos, ferramentas e materiais utilizados nos ensaios. O trabalho foi desenvolvido nas dependências da UCS com o auxílio dos equipamentos disponíveis no laboratório de usinagem, sala 114 bloco D.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A proposta do presente trabalho é analisar a influência da variável polimento no desempenho de fresas de topo em metal-duro, atuando no fresamento do aço AISI P20. Baseado em estudos anteriores realizados na UCS pelo grupo de usinagem (GUS), este trabalho utilizou um novo tipo de escova para o polimento, contribuindo para o desenvolvimento de novas técnicas de preparação da ponta por escovamento.

Para atingir este objetivo, o planejamento compreendeu a preparação do gume pelo uso de escovas com cerdas abrasivas dispostas radialmente. Após, as ferramentas preparadas foram submetidas a testes de usinagem para avaliação do parâmetro de desgaste de fim de vida, rugosidade e textura da superfície usinada. Os resultados obtidos foram comparados com o desempenho de ferramentas sem preparação da ponta e com polimento do gume por esponja abrasiva, ambos já estudados por Ost (2016). Para maior confiabilidade dos resultados, os parâmetros utilizados no polimento do gume e testes de usinagem foram os mesmos dos estudos anteriores. Paralelamente as fresas em metal-duro e o material do corpo de prova são os mesmos para todos os ensaios citados.

3.1.1 Variáveis de entrada

Seguindo os objetivos propostos, foram utilizadas como variáveis de entradas o polimento por escovamento com esponja abrasiva (EA), polimento por escovamento com cerdas abrasivas dispostas radialmente (CA) e ferramenta sem preparação da ponta (SP). As escovas comparadas se diferem pela orientação de seus filamentos em relação à superfície a ser preparada, tendo a esponja uma orientação randômica de suas fibras e a escova de cerdas uma orientação perpendicular de seus filamentos. O abrasivo presente em ambas as escovas é carboneto de silício (SiC). Conforme analisado por Vopát et al. (2020), o abrasivo carboneto

de silício (SiC) resulta em uma melhor simetria da microgeometria do gume após o polimento e valores de raio da ponta mais adequados para a usinagem com fresa de topo. O Quadro 1 apresenta as especificações dos filamentos utilizados para a preparação da ponta das ferramentas.

Quadro 1 – Especificação dos filamentos para polimento

Filamento	Abrasivo	Granulometria	Classificação / Nome comercial
Cerdas e Esponja	SiC	400	SSF / Super fina

Fonte: adaptado de 3M (2020).

3.1.2 Variáveis de saída

As variáveis de saída após os testes de usinagem englobam o desgaste da ferramenta e a qualidade da superfície usinada. Referente ao desgaste, o critério de fim de vida da ferramenta foi fixado em (VB_{max}) de 0,2 mm ou formação de microlascamento da ferramenta. A utilização do critério de fim de vida (VB_{Max} 0,2mm) é fundamentada nos testes realizados por Bassett, Köhler e Denkena (2012). Os autores concluíram que ferramentas com preparação do gume atingem o desgaste de flanco máximo sem apresentarem microlascamentos, se comparadas a uma ferramenta sem preparação.

Os parâmetros avaliados referentes à qualidade superficial são à rugosidade da superfície usinada com a medição dos parâmetros R_a , R_z e R_{max} e a textura da superfície. Os parâmetros de rugosidade e textura são avaliados em dois momentos, um no início e o outro no fim dos ensaios, após a verificação de que o critério de fim de vida foi alcançado. Os parâmetros de medição da rugosidade utilizados nessa etapa foram o *cut-off* de 0,8 mm com 5 medições por região usinada.

3.1.3 Corpo de prova

O material escolhido para o corpo de prova foi o aço AISI P20 com dureza média de 38 HR_C. A preparação do corpo de prova para o teste consiste em usinagem prévia para as dimensões 252 mm x 80 mm x 60 mm. As faces de contato do material com a morsa que fixa a peça foram retificadas para melhor rigidez do conjunto durante a usinagem. A escolha do material foi baseada na sua grande utilização na fabricação de moldes e matrizes muito comum em nossa região.

Para facilitar as medições durante os ensaios, foram utilizados 2 corpos de prova. Um compreende o teste de usinagem e as avaliações do critério de fim de vida da ferramenta. O segundo foi utilizado nas avaliações referentes à qualidade superficial.

3.1.4 Equipamentos

A preparação por escovamento foi realizada com o auxílio de uma miniretífica pneumática da marca Campbell Hausfeld, modelo TL102002 com rotação máxima de 25000 rpm quando utilizado a pressão máxima de trabalho recomendada de 6,2 bar. Os discos de escovas com cerdas abrasivas foram fixados em um suporte de aço e acoplados na miniretífica através e uma pinça que as fixa no suporte.

Para avaliação da homogeneidade e o raio do gume das ferramentas após a preparação foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo, marca Tescan, modelo Mira 3 e pela estação de medição de contorno Mahr, modelo MarSurf CD 280.

Os ensaios de usinagem foram realizados no centro de usinagem modelo LG-500 da marca Hartford, com potência de 10 kW e rotação máxima de 10.000 rpm, estabelecido no laboratório de novas tecnologias de produção (LNTP), situado nas dependências da UCS. O perfil de rugosidades foi obtido pelo rugosímetro portátil da marca Mitutoyo, modelo SJ-301, com resolução de 0,01 µm, com raio de ponta do apalpador de diamante de 5 µm e coincidência de 90°. As texturas foram avaliadas por imagens através do estereoscópio trinocular de medição universal Entex, modelo TNE-10B.

O desgaste (VB_{max}) ou o microlascamento, referentes ao critério de fim de vida, foram avaliados no microscópio óptico Nikon, modelo Epiphot 200.

Para verificação da rotação da miniretífica foi utilizado um tacômetro a laser do fabricante Extech Instruments, modelo 461920.

3.1.5 Ferramentas

O modelo de ferramenta escolhida para receber a preparação do gume e realizar os ensaios de usinagem foi a fresa de topo reto inteiriça em metal-duro da Seco Tools, de código 91060 da linha Jabro, com 4 gumes sem preparação da ponta e sem revestimento. A Figura 14 representa as especificações dimensionais da ferramenta utilizada.

As ferramentas passaram pelo processo de reconstrução antes do início de cada ensaio. Segundo estudado por Teixeira (1995), o processo de reconstrução de uma ferramenta

garante uma condição geométrica similar a original. A técnica de reconstrução foi utilizada neste trabalho com o objetivo de eliminar a variável macrogeometria da ferramenta, evitando assim possíveis distorções nos resultados obtidos.

A macrogeometria da ferramenta possui um ângulo de hélice de 30 °, ângulo de cunha (β) é 72°, ângulo de folga ou incidência (α) de 10° e ângulo de saída (γ) de 8°. Foi utilizado uma razão de (l_2/D) igual a 3 para a fixação da ferramenta no porta ferramentas do centro de usinagem durante os ensaios.

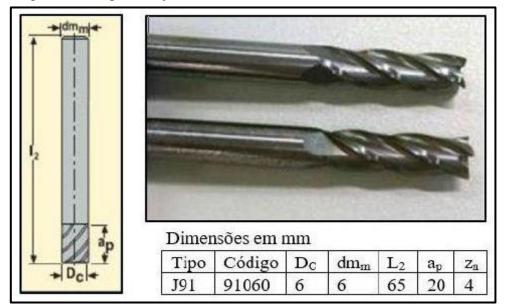


Figura 14 – Especificação das fresas em metal-duro utilizadas nos ensaios

Fonte: adaptado de Ost (2016).

3.2 PREPARAÇÃO DO GUME POR CERDAS ABRASIVAS

O escovamento com cerdas abrasivas dispostas radialmente foi realizado nas dependências da UCS, seguindo o procedimento realizado nos estudos desenvolvidos por Buckell, (2019). Para realizar o posicionamento da escova em relação a fresa, a base do suporte foi utilizada como referência. Após simulação em software CAD foi encontrado as coordenadas para posicionar o suporte a fim de garantir os ângulos ilustrados na Figura 15.

Para garantir a movimentação do gume helicoidal da fresa junto à escova foi utilizado um comando de rosqueamento na programação do centro de usinagem. Levando em consideração o raio da fresa de 3mm o valor de velocidade angular calculado foi de 6,3 rpm, porém devido a limitação do equipamento o valor utilizado foi de 7 rpm para rotação da rosca. O deslocamento realizado pela ferramenta foi de 3,75 mm, percorrendo cada gume um total de 32 vezes. A profundidade de contato estipulada para a escovação foi de 1,0 mm (BUCKELL, 2019). Devido à limitação dos equipamentos utilizados na preparação das

ferramentas, o ajuste da profundidade de contato foi realizado de modo manual, tornando este parâmetro dependente da sensibilidade do operador.

Para garantir a confiabilidade nos resultados e posterior comparação com os experimentos realizados anteriormente, a rotação utilizada na escova buscou como parâmetro inicial a velocidade tangencial de 7,854 m/s ou 6000 rpm, utilizando uma escova com 25,0 mm de diâmetro (BUCKELL, 2019). Como a escova utilizada neste trabalho tem um diâmetro de 76 mm a rotação calculada foi de 1973 rpm para manter a velocidade tangencial.

Contudo, a rotação calculada se mostrou muito baixa para a utilização na miniretífica pneumática, ocasionando a parada repentina da escova quando iniciado o polimento, devido à falta de torque disponível no equipamento. Uma nova rotação foi utilizada a fim de contornar o ocorrido, sendo estipulada em 2600 rpm. Com esta nova rotação a velocidade tangencial utilizada no escovamento foi de 10,34 m/s. Segundo Bassett, Köhler e Denkena (2012), a velocidade tangencial de uma escova composta por filamentos de nylon não deve ultrapassar os 13,2 m/s, sendo assim, a rotação estipulada garante a integridade da escova utilizada nos testes aqui apresentados.

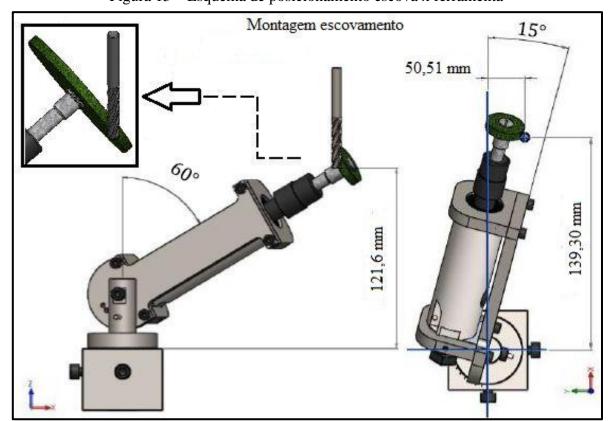


Figura 15 – Esquema de posicionamento escova x ferramenta

Fonte: adaptado de Buckell (2019).

A escova com filamentos radiais utilizada para o polimento pertence à linha Radial Bristle Discs da 3M e suas especificações estão ilustradas no Quadro 2. A escova é dotada de filamentos de nylon abrasivos dispostos radialmente presos a um núcleo conforme apresentado na Figura 16.

Quadro 2 – Especificações escova de cerdas abrasivas

Quinaro = Especiarionigo do esco y in de cortado mermor y ins							
Serial	Dimensão	Grana	na Cor Max. rpm		Abrasivo		
30129-7	3" x 3/8"	400	Azul	25000	SiC		

Fonte: adaptado de 3M (2020).

Figura 16 – Escova utilizada nos ensaios



Fonte: o autor (2020).

3.3 TESTE DE USINAGEM

A proposta dos testes de usinagem foi manter os parâmetros de usinagem fixos, garantido um menor número de variáveis durante o processo. Baseado na literatura e em outros experimentos já realizados, a velocidade de corte (Vc) adotada foi de 180 m/min, o avanço por gume (Fz) de 0,06 mm/gume, profundidade axial (a_p) de 0,5mm e profundidade lateral de (a_e) de 0,2 mm. Para realização dos ensaios no corpo de prova, foi adotada uma estratégia concordante com passes de 252 mm sem a utilização de fluído refrigerante.

As fresas de topo foram submetidas ao fresamento do aço P20 até atingirem o valor de desgaste predeterminado (VB_{max}) de 0,2 mm. A avaliação do desgaste foi realizada a cada 5000 mm lineares, resultando em 20 passagens da fresa sobre o corpo de prova. A cada avaliação foi medido o desgaste de flanco nos quatro gumes da ferramenta.

4 RESULTADOS

Este capítulo tem como premissa apresentar e discutir os resultados obtidos com a preparação da ferramenta e os testes de vida útil realizados. Inicialmente são apresentadas as caracterizações das escovas e ferramentas utilizadas nos ensaios. Posteriormente foram evidenciados os efeitos do tratamento realizado em relação à qualidade superficial, rugosidade e textura, e a vida útil da ferramenta, com base no desgaste gerado e seus mecanismos de formação.

4.1 ENSAIOS DE USINAGEM

Conforme descrito anteriormente, para a realização dos ensaios de usinagem foram utilizadas duas fresas em metal-duro. Inicialmente as ferramentas foram submetidas ao teste de usinagem sem nenhum tipo de preparação do gume. Logo após, tiveram seu gume reconstruído e receberam o tratamento do gume com escovas compostas por esponjas abrasivas, passando novamente pelos testes de usinagem. Novamente foram reconstruídas e passaram pelo mesmo procedimento de polimento da ponta, agora com escovas dotadas de cerdas abrasivas dispostas radialmente, sendo essas utilizadas para o último teste de usinagem. As ferramentas foram classificadas conforme o tipo de preparação, descrito no Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação das fresas utilizadas nos testes

Tipo de preparação da ponta	Número da fresa	Classificação	Autor	
Sem preparação	1	SP - 1	Ost (2016)	
Sem preparação	2	SP - 2	Ost (2016)	
Esponja abrasiva	3	EA - 1	Ost (2016)	
Esponja abrasiva	4	EA - 2	Ost (2016)	
Cerdas abrasiva	5	CA - 1	Vinicius (2020)	
Cerdas abrasiva	6	CA - 2	Vinicius (2020)	

Fonte: o autor (2020).

4.1.1 Caracterização das ferramentas

A caracterização tem como foco avaliar o efeito dos tratamentos realizados no gume de cada ferramenta em relação à ferramenta sem preparação. Para atender este objetivo as superfícies geradas foram analisadas por meio do microscópio óptico.

As ferramentas sem preparação SP-1 e SP-2 foram analisadas por Ost (2016). Conforme apresentado na Figura 17, ficam evidentes as marcas oriundas da afiação por parte do fabricante. Analisando a superfície do gume foi detectada a presença de irregularidades na qual é possível observar a estrutura granular do metal-duro. As irregularidades atuam como facilitadores para o aparecimento de trincas durante a usinagem devido ao acúmulo de tensões na região citada (OST, 2016).

Flanco

Marcas
afiação

Irregularidades
presentes na
superfície

SP-1

MARAS TERCA

SUPERANCE TORRE TO THE ADVIT TO THE AD

Figura 17 – Análise das ferramentas sem preparação (SP)

Fonte: adaptado de Ost (2016).

As ferramentas que passaram pelo processo de polimento com esponjas abrasivas (EA-1, EA-2) foram analisadas por Ost (2016) e apresentadas na Figura 18.

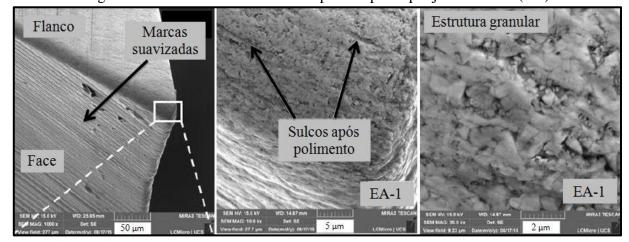


Figura 18 – Análise das ferramentas polidas por esponjas abrasivas (EA)

Fonte: adaptado de Ost (2016).

Foi observado à suavização das marcas de afiação na face da ferramenta EA-1. As ferramentas apresentaram uma melhor definição do gume, sendo possível notar o

arredondamento gerado. É possível notar os sulcos resultantes do polimento em relação a fresa sem preparação, resultado da direção de polimento aplicada durante a preparação da ponta. As irregularidades foram atenuadas com o polimento, reduzindo a visualização da estrutura granular em comparação com as ferramentas sem preparação (OST, 2016).

As fresas tratadas, com escovas dotadas de cerdas abrasivas dispostas radialmente (CA-1 e CA-2), foram analisadas com o auxílio das imagens geradas no microscópio óptico Nikon, modelo Epiphot 200 e demonstradas na Figura 19.

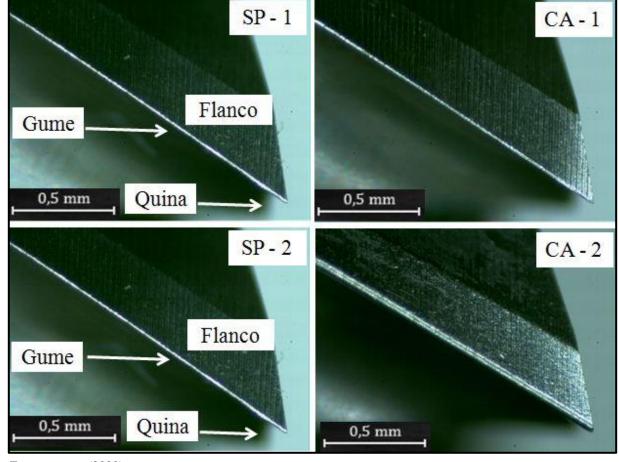


Figura 19 – Análise das ferramentas polidas por cerdas abrasivas (CA)

Fonte: o autor (2020).

Analisando as imagens da ferramenta CA-1, não é possível notar suavização na região do gume e da quina em relação à ferramenta sem preparação. Quanto ao gume, as imagens não apresentam diferenças significativas entre as duas condições da ferramenta. As imagens geradas da face dos gumes e do topo da ferramenta também não apresentaram diferenças significativas resultando em uma avaliação inconclusiva das superfícies.

Já com as imagens geradas a partir da ferramenta CA-2 é possível identificar um gume bem definido em relação à ferramenta não preparada, caracterizando um

arredondamento da região citada. As marcas de afiação, presentes no flanco, foram suavizadas com o polimento e a quina apresenta uma suavização do seu raio em relação à quina sem polimento. Assim como ocorreu na ferramenta anterior às imagens geradas da face e do topo desta ferramenta não contribuíram para uma avaliação conclusiva.

4.1.2 Caracterização das escovas

A caracterização das escovas se faz necessário para o melhor entendimento da sua atuação na preparação do gume das ferramentas tratadas. A esponja abrasiva foi analisada por Ost (2016). Em seu estudo avaliou que as esponjas são formadas por uma malha e que seus filamentos têm um diâmetro de 50 μm. O material que constitui a fibra é formado principalmente de carbono, sendo esse classificado como um nylon. O abrasivo impregnado nos filamentos é composto primariamente de silício e classificado como um carbeto de silício. A Figura 20 demonstra inicialmente a malha, a orientação randômica dos filamentos e a dispersão do abrasivo impregnado nas cerdas da esponja abrasiva (OST, 2016).

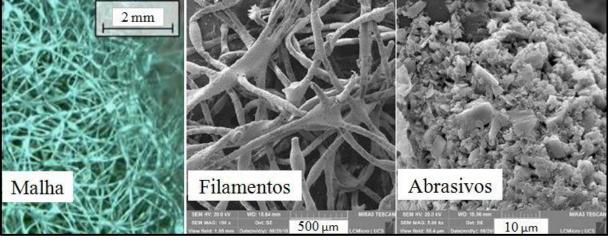


Figura 20 – Caracterização esponja abrasiva (EA)

Fonte: adaptado de Ost (2016).

A caracterização da escova composta por cerdas abrasivas radiais foi realizada através das imagens do microscópio óptico. Conforme ilustrado na Figura 21, a disposição dos filamentos é inicialmente perpendicular ao eixo de rotação da escova convergindo para um ângulo característico das escovas dotadas com este tipo de orientação das cerdas. Após é mostrado o filamento ainda sem utilização, onde é possível notar a sua simetria de construção e rebarbas oriundas do processo de fabricação. Na imagem seguinte é mostrado o filamento

após a escovação, onde a região desgastada pelo contado com a superfície preparada é evidenciada. Com a imagem gerada é possível visualizar a área efetiva de contado que o filamento foi exposto durante o polimento. Também foi evidente o desgaste do filamento através da exposição das fibras e seu sentido de desprendimento indicado pelas setas vermelhas inseridas na imagem. Não foi possível detectar o escurecimento característico de um filamento que recebeu uma grande carga térmica nas escovas estudadas neste trabalho.

Filamento novo

Rebarbas

Simetria do filamento

O,5 mm

Fibras e sentido desprendimento

Figura 21 – Caracterização escova de cerdas radiais (CA)

Fonte: o autor (2020).

Segundo Denkena, Krödel e Hein (2019), se encontrada, esta coloração poderia indicar que os filamentos foram degradados pelas altas temperaturas de trabalhos. Logo as imagens sugerem que os parâmetros utilizados para o polimento neste trabalho foram corretos, no que diz respeito a evitar uma condição que leve a degradação precoce da escova.

4.2 QUALIDADE SUPERFICIAL

O objetivo da avaliação da qualidade superficial é comparar o desempenho das ferramentas conforme o tipo de preparação aplicada, identificando os padrões gerados na superfície usinada.

Para a caracterização e análise da qualidade superficial foram utilizados os dados qualitativos e quantitativos referentes à textura e rugosidade do corpo de prova usinado. As medições de rugosidade foram realizadas nas superfícies de início e fim da vida útil da ferramenta (VB_{max} 0,2 mm) gerando os valores de Ra, Rz e Rmax e o perfil de rugosidades. Complementando a análise foram avaliadas as texturas com o auxílio das imagens captadas pelo microscópio óptico nas mesmas regiões já citadas.

4.2.1 Textura e rugosidade do corpo de prova

Segundo Ost (2016), a aplicação da ferramenta SP retornou uma textura com marcas de usinagem bem definidas no início da vida útil da ferramenta. O perfil de rugosidades mostra um padrão linear na superfície. Já no final da vida útil da ferramenta não é possível notar as marcas de usinagem e o perfil de rugosidades retorna um padrão irregular da superfície analisada. Esta mudança na textura e no perfil de rugosidades está associada ao desgaste dos gumes da ferramenta, onde ocorre à diminuição no cisalhamento do material e o aumento das deformações plásticas pelo processo de corte da ferramenta. A textura e o perfil de rugosidades da ferramenta SP podem ser visualizados na Figura 22.

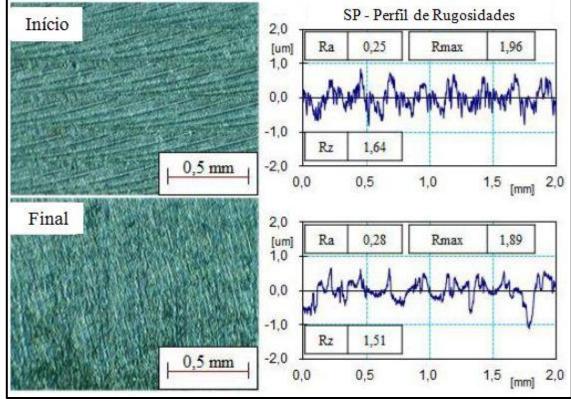


Figura 22 – Textura e perfil de rugosidades ferramenta (SP)

Fonte: adaptado de Ost (2016).

A Figura 23 apresenta a superfície usinada pela ferramenta EA que foi analisada por Ost (2016) e traz resultados semelhantes à ferramenta sem preparação no que diz respeito à textura e perfil de rugosidades. De início estão presentes as marcas de passagem da ferramenta, já no fim da vida útil a textura é predominantemente irregular. Quanto ao perfil de rugosidades, inicialmente existe um padrão bem definido. No final da vida útil o perfil da superfície analisada se torna mais irregular, resultado do aumento da degradação do gume.

EA - Perfil de Rugosidades Início 2,0 [um] 1,88 Ra 0,25 Rmax 1,0 0,0 -1,0 Rz 1,65 0,5 mm -2,0 1,5 [mm] 0,0 0,5 1,0 2,0 Final 2,0 [um] Ra 0,13 0,94 Rmax 1.0 0,0 -1,0 Rz 0,83 0.5 mm -2,0 0,5 0,0 1,0 1,5 [mm] 2,0

Figura 23 – Textura e perfil de rugosidades ferramenta (EA)

Fonte: adaptado de Ost (2016).

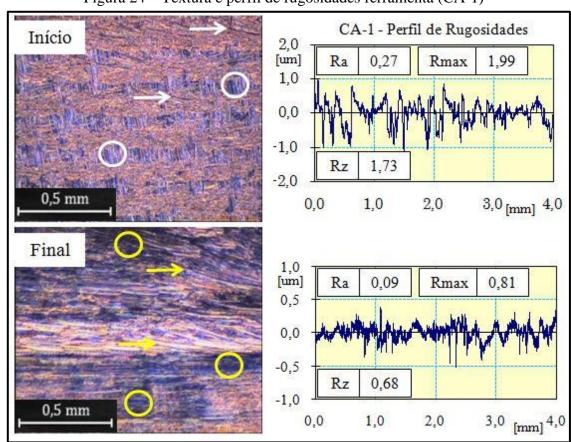


Figura 24 – Textura e perfil de rugosidades ferramenta (CA-1)

Fonte: o autor (2020).

As Figuras 24 e 25 ilustram as texturas e os perfis de rugosidade gerados pelas ferramentas CA-1 e CA-2. As setas e os círculos indicam as marcas de avanço e as deformações encontradas respectivamente. A cor branca utilizada nas indicações sinaliza o início do processo de corte, a cor amarela remete ao final do processo de corte.

A qualidade superficial resultante da usinagem com a ferramenta preparada por cerdas abrasivas radiais CA-1 pode ser visualizada na Figura 24. Inicialmente a textura da superfície analisada apresenta marcas de passagem da ferramenta menos definida e maiores zonas de deformações que as respectivas texturas das ferramentas SP e EA. A textura gerada no final da vida útil retornou uma superfície predominantemente irregular, mas ainda com marcas de passagem visíveis. A irregularidade da textura pode ser associada ao desgaste dos gumes, uma vez que, o processo de corte tem maior predominância da deformação do material em detrimento do cisalhamento.

A textura inicial gerada pela ferramenta CA-2 apresentou resultado semelhante a CA-1. A textura no final da vida útil de CA-2 é predominantemente composta pelas marcas longitudinais das deformações geradas pelo processo de corte. As diferenças de textura encontradas em CA-1 e CA-2 corroboram para uma melhor preparação do gume na segunda ferramenta, onde foi caracterizado um arredondamento mais evidente e uma vida útil superior.

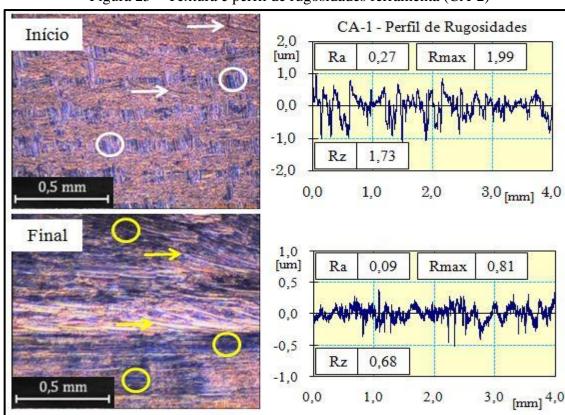


Figura 25 – Textura e perfil de rugosidades ferramenta (CA-2)

Fonte: o autor (2020).

Segundo os autores Denkena, Koehler e Rehe (2012) existe uma correlação entre o raio da ponta aplicado, o fator de forma K, a área contato e as forças de corte envolvidas. Os autores observaram que no fresamento de canais no aço 42CrMo4, utilizando diferentes fatores de forma, o comportamento da vida útil da ferramenta e integridade superficial retornou melhores resultados quando os valores de K<1. Concluíram que tal condição permitiu uma personalização mais próxima do ideal da porção do material que é deformado entre a peça e a ferramenta (h_{min}) localizado abaixo da zona de estagnação. Isso pode explicar a diferença de textura encontrada entre CA-1 e CA-2, que corrobora para que a preparação do gume em CA-2 obteve uma espessura do cavaco não deformado (h_{min}) mais adequada à realidade do processo em questão.

As ferramentas com preparação do gume proporcionaram maior influência na textura se comparadas à ferramenta sem preparação. Segundo Zeilmann et al. (2013), as raias deixadas pela ferramenta podem ter sido reduzidas devido a maior área de contato entre o gume e a superfície, resultado do tratamento aplicado na ponta. Conforme Vopát et al. (2020), o aumento do raio resulta em uma maior deformação plástica da superfície que contribui significativamente para uma melhora nas marcas de passagem da ferramenta. Já no final da vida útil das ferramentas avaliadas, não foi possível verificar a existência de um padrão regular das marcas deixadas pelo avanço da ferramenta em questão.

A avaliação da rugosidade foi realizada no início e no fim da vida útil de cada ferramenta testada, sendo registrado 5 medições em cada região e realizado uma média para a representação nos Gráficos 1 e 2 apresentados a seguir. Neste trabalho, os valores de rugosidade referentes às ferramentas SP e EA são retirados dos estudos realizados por Ost (2016). Os valores de rugosidade obtidos pelas ferramentas CA foram gerados e comparados com as demais condições.

Inicialmente a rugosidade de todas as condições testadas tem valores mais elevados, já no fim de sua vida apresentam valores menores de rugosidade. Tal comportamento apenas não é observado na condição da ferramenta sem preparação que retornou valores próximos de Ra tanto para o início quanto para o fim da vida útil. Também é possível observar que a condição SP apresentou os maiores valores de rugosidade e as maiores dispersões dentre as condições mensuradas, tanto no início como no fim de sua vida útil.

Os resultados apontam que todas as ferramentas obtiveram valores de rugosidade similares considerando os desvios padrões indicados nos gráficos. Entre as condições testadas, as ferramentas com preparação têm a tendência em atingir os menores valores médios de rugosidade em relação à ferramenta sem preparação. Segundo Denkena, Koehler e

e Rehe (2012) e Vopát et al. (2020), tal tendência pode ser explicada pelo fato de que arredondamento da ponta tem influência na qualidade superficial devido a alteração do contado da ferramenta com a peça, produzindo uma maior zona de deformação que contribui para suavizar as marcas de passagem da ferramenta.

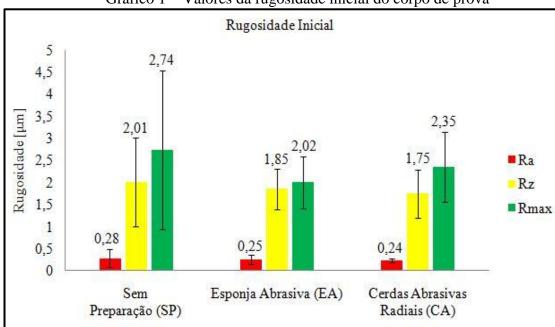
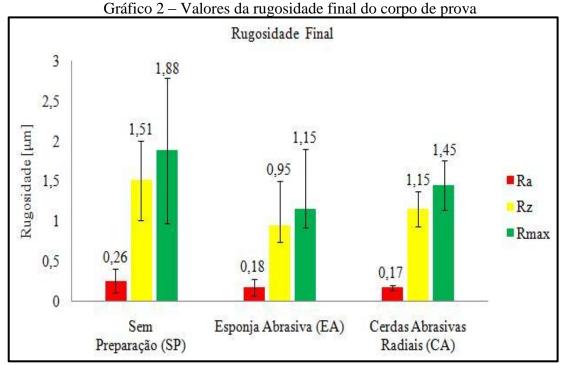


Gráfico 1 – Valores da rugosidade inicial do corpo de prova

Fonte: adaptado de Ost (2016).



Fonte: adaptado de Ost (2016).

4.3 DEGASTE DA FERRAMENTA

Atendendo aos objetivos propostos, neste capítulo são apresentados os resultados referentes ao desgaste das ferramentas avaliadas e suas causas, através da análise dos mecanismos de desgaste. As curvas de desgaste referentes às ferramentas SP e EA foram retiradas dos estudos realizados por Ost (2016). O comportamento do desgaste de CA foi gerado e comparado com os demais resultados.

A avaliação ocorreu a cada 5 metros de comprimento usinado e contemplou a medição do desgaste VB_{max} e avaliação dos mecanismos de desgastes presentes. O critério de desgaste utilizado para o fim da vida útil foi o VB_{max} de 0,2 mm. Para a confirmação deste critério as medições ocorreram até que 2 gumes de cada ferramenta apresentassem o valor máximo estabelecido. Os valores apresentados são uma média das medições de desgaste encontrada nos 4 gumes da ferramenta selecionada.

Para gerar o gráfico de vida útil da ferramenta preparada por cerdas abrasivas radiais (CA) foram considerados apenas os valores medidos na ferramenta CA-2, visto que, a ferramenta CA-1 não recebeu uma preparação do gume efetiva devido à dificuldade inicial do acerto da rotação da escova, fato este já citado no capítulo 3.2 deste trabalho. Os resultados de CA-1 não utilizado nos gráficos de vida útil não foram descartados, mais sim contribuíram para análise dos mecanismos de desgaste também apresentados neste capítulo.

4.3.1 Vida útil das ferramentas

Os três tipos de condições testadas foram analisados após a medição do desgaste nos intervalos citados. As curvas podem ser visualizadas na Figura 26.

Inicialmente o gráfico apresenta na cor azul, os resultados da ferramenta sem preparação do gume (SP). Logo após, em vermelho, está demonstrado os valores encontrados para a ferramenta com preparação por esponja abrasiva (EA). Por fim, em verde, estão os resultados encontrados para a ferramenta preparada por cerdas abrasivas dispostas radialmente (CA).

Analisando as curvas é possível notar que inicialmente a inclinação é mais acentuada em todas as condições testadas, estágio no qual remete o ajuste do gume conforme indicado por Machado et al., (2009). Após, o gráfico demonstra uma zona de estabilização onde o desgaste se torna regular em todas as ferramentas testadas. Não ocorreu falha catastrófica em nenhuma das condições testadas. O critério de desgaste adotado VB_{max} de 0,2 mm contribuiu

para a curva não alcançar o estágio 3, citado no capítulo 2.4.1.2 deste trabalho, caracterizado pela falha da ferramenta.

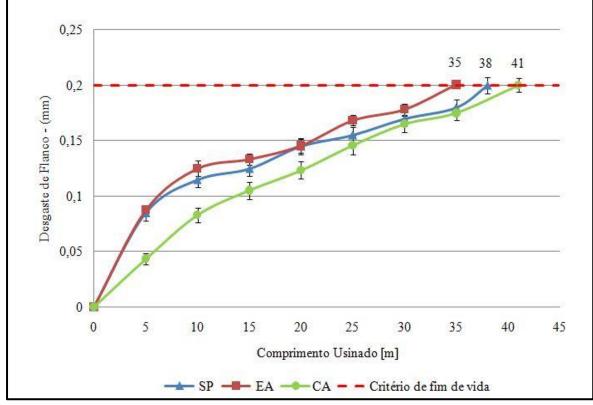


Figura 26 – Comportamento do desgaste

Fonte: adaptado de Ost (2016).

O resultado de comprimento usinado até o desgaste de flanco máximo, obtido pela ferramenta SP, foi utilizado como referência para comparação com os outros tipos de preparação. Os valores indicados no gráfico são decorrentes de interpolações lineares realizadas com os valores encontrados, visto que, nem sempre é possível interromper o teste de usinagem exatamente quando o critério de desgaste é alcançado.

A ferramenta EA percorreu 35m até chegar ao critério de fim de vida, resultando em um comprimento 8% menor se comparado a ferramenta SP, esta alcançando os 38m. Essa diferença pode ser associada ao tratamento aplicado na ferramenta. Segundo analisado por Ost (2016), o escovamento com o uso de esponjas abrasivas acabou por aumentar a rugosidade na região do gume conforme medições realizadas pelo autor. Esta região mais áspera contribuiu para uma adesão mais proeminente. Ainda conforme o autor, este fenômeno pode estar ligado à característica de corte intermitente presente no processo de fresamento.

Na condição de tratamento por escova abrasiva dotada de cerdas radiais (CA), o comprimento usinado foi similar para a ferramenta testada e sua réplica. A ferramenta CA-1

obteve o valor de 38m contra os 41m da ferramenta CA-2. Em comparação com a ferramenta sem preparação SP, CA-2 obteve uma melhora de 8% da vida útil. Comparando com a ferramenta EA, CA-2 obteve um aumento na casa de 15% da vida útil. Tal melhora pode ser atribuída à preparação do gume por escovas com cerdas radiais. Conforme constatado na caracterização das ferramentas, CA-2 obteve após a preparação, um gume mais definido sinalizando um arredondamento maior se comparado com CA-1.

A preparação do gume pode retornar ganhos melhores na vida da ferramenta conforme relatado por Vopát et al. (2020), que obteve um aumento de até 36% com o arredondamento da ponta no torneamento do aço inoxidável austenítico. Porém o aumento de 8% na vida útil em relação a uma ferramenta não preparada encontrado neste trabalho, é significativo e indica que a preparação do gume contribui na redução do desgaste e na melhora da qualidade superficial da peça usinada. Segundo Denkena, Krödel e Hein (2019), a preparação do gume deve ter seus parâmetros de polimento personalizados para cada tipo de condição, garantindo assim a melhor performance da ferramenta com gume preparado.

4.3.2 Avaliação dos mecanismos de desgaste

Para a avaliação dos mecanismos de desgaste foram utilizadas imagens do flanco das ferramentas geradas no microscópio óptico. As imagens podem ser visualizadas na Figura 27 disposta a seguir.

A partir das imagens ilustradas na figura 27 é possível identificar os desgastes gerados pelo processo de usinagem. Analisando cada condição, os mecanismos mais evidentes em todas as ferramentas foram a abrasão e adesão.

A imagem referente à ferramenta EA-1 foi analisada por Ost (2016). O mecanismo predominante foi a abrasão responsável pelo desgaste de flanco indicado na figura pelo VB_{max} . A adesão é caracterizada pelas regiões mais escuras mostradas na figura.

Os mecanismos de desgaste presentes nas ferramentas CA-1 e CA-2 são similares a EA-1 e foram mensurados com o auxílio do microscópico óptico. A abrasão observada corresponde ao desgaste VB_{max} e os pontos indicados representam a adesão.

Conforme Stemmer (2005), a abrasão evidenciada nas ferramentas é esperada. Sua ocorrência pode ser explicada pelo escorregamento entre a peça e a ferramenta sobre altas pressões e temperaturas. Tal condição resulta no arrancamento contínuo de finas partículas da superfície da ferramenta, caracterizando a abrasão. A adesão visualizada em todas as ferramentas pode ser considerada leve e não causadora de microlascamentos. Segundo König

e Klocke (1997), a adesão nos pontos de contato é causada pela afinidade química entre o cavaco recém cisalhado e a ferramenta. O autor também salienta que a característica de corte interrompido no fresamento de topo e a ausência de fluído lubrirefrigerante contribuem para a formação de adesão, ambas as características presentes em todas as condições testadas.

EA-1

Adesão

Adesão

O,2 mm

O,2 mm

O,2 mm

O,2 mm

Figura 27 – Caracterização dos mecanismos de desgaste

Fonte: adaptado de Ost (2016).

5 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho contribuiu para o melhor entendimento do processo de preparação do gume por escovamento. Introduzindo a variável orientação do filamento, foi possível compreender sua interação com as superfícies preparadas com base nos resultados de vida útil, qualidade superficial e os desgastes avaliados nas escovas utilizadas.

A caracterização das ferramentas proporcionou o melhor entendimento sobre a atuação de cada tipo de preparação testada. A escova com cerdas dispostas radialmente obteve os melhores resultados, onde foi possível notar um arredondamento mais homogêneo e evidente e uma maior suavização das marcas de afiação no flanco da ferramenta. Já a preparação com esponja abrasiva atuou principalmente nas superfícies de flanco e face da ferramenta preparada, não obtendo resultados significativos no arredondamento do gume.

A caracterização dos filamentos nas escovas resultou em um melhor entendimento do desgaste durante o polimento. Nas escovas com cerdas radiais foi possível notar o desprendimento e a migração mais pronunciada das fibras para a extremidade filamento, resultando em uma melhor exposição dos novos grãos no polimento.

Foram obtidos resultados de textura semelhantes para todas as condições testadas. Inicialmente é possível notar as linhas de passagem da ferramenta e um perfil de rugosidades bem definidos. No final da vida útil as texturas verificadas são irregulares e não é possível verificar um perfil de rugosidade bem definido.

Os valores de rugosidade encontrados nas condições analisadas podem ser considerados similares, tanto para o início quanto para o fim da vida útil. Porém, as medições apontam uma tendência a menores médias de rugosidade para as superfícies usinadas por ferramentas que receberam preparação do gume.

Em relação à vida útil, a ferramenta sem preparação foi usada como referência. Na preparação por cerdas abrasivas radiais, foi observado um aumento de 8%, indicando uma influência significativa na durabilidade da ferramenta. Com a preparação por esponja abrasiva não ocorreram ganhos significativos, sendo os valores de comprimento usinado até o critério de desgaste, semelhantes à ferramenta de referência. As curvas de comportamento de desgaste avaliadas foram similares entre as condições testadas.

As ferramentas apresentaram similaridade nos mecanismos de desgaste. Através das imagens geradas é possível notar que a abrasão obteve maior influência no desgaste de flanco. A presença de material aderido nos pontos de contato foi considerada normal em relação ao processo de usinagem utilizado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilizando os resultados obtidos neste trabalho, é sugerida para sua complementação a avaliação dos seguintes tópicos:

- a) avaliar o desgaste da ferramenta preparada com escovas radiais com diferentes tipo de abrasivos;
- b) avaliar o desgaste da ferramenta com diferentes condições de posicionamento da escova radial durante o polimento;
 - c) avaliar o desgaste dos filamentos das escovas após o polimento.
 - d) avaliar o desgaste do abrasivo das escovas após o polimento.

REFERÊNCIAS

3M (Brasil). Folhas de Acabamento Scotch-BriteTM Multi-Flex. 2019. Disponível em: https://www.3m.com.br/3M/pt_BR/3m-do-brasil/todos-os-produtos-3m-do-brasil/~/Folhas-de-Acabamento-Scotch-Brite-Multi-

<u>Flex/?N=5002385+8709320+3293186372&preselect=8710644+3293786499&rt=rud</u>. Acesso em: 15 junho 2020

BASSETT, E.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI 1045 with coated WC-Co inserts. Cirp **Journal Of Manufacturing Science And Technology**, [s.l.], v. 5, n. 2, p.108-126, jan. 2012.

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.

BET L., Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e sondas ópticas tipo seguidor, Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 243p, 1999.

BIERMANN, D.; WOLF, M.; ASSMUTH, R. Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills. **Procedia CIRP**, n. 1, p.172 – 177, 2012.

BLACK, J. T., Introduction to machining processes. **Metals handbook: machining.** 9. ed. Nova York: ASM International, 1995.

BUCKELL, WILLIAM. **Avaliação da preparação de gume através do processo de escovação para aplicação em fresamento de topo reto**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Caxias do Sul, RS, 76 p, 2019.

DENKENA, B.; BIERMANN, D.. Cutting edge geometries. **Cirp Annals**, [s.l.], v. 63, n. 2, p.631-653, 2014.

DENKENA, B.; KOEHLER, J.; REHE, M. Influence of the Honed Cutting Edge on Tool 58 Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel. **Procedia CIRP**, n. 1, p. 190 – 195, 2012.

DENKENA, B.; KRÖDEL, A.; HEIN, M. Innovative method for cutting edge preparation with flexible diamond tools. **Procedia CIRP**, Hannover, v. 86, p.121-125, 2019.

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

FERRARESI D., Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: E. Blucher, 3v, 1970.

FULEMOVÁ J., JANDA Z., Influence of the Cutting Edge Radius and the Cutting Edge Preparation on Tool Life and Cutting Forces at Inserts with Wiper Geometry. **Procedia Engineering**, 69:565–573, 2014.

FULEMOVÁ, Jaroslava; REHOR, Jan. Influence of form Factor of the Cutting Edge on Tool Life during Finishing Milling. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 100, p.682-688, 2015. Elsevier BV.

GONÇALVES, André; BOING, Denis. Influência da microgeometria do gume e do revestimento de ferramentas de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 com 55 HRC. 10° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, São Carlos, SP, Brasil, 2019.

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

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

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

MATHAI, George; MELKOTE, Shreyes. Effect of process parameters on the rate of abrasive assisted brush deburring of microgrooves. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 57, p.46-54, jun. 2012.

OLIVEIRA, Juliano. Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas Para Produção de Moldes e Matrizes. 2006. 92 p. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

OST C. A., Análise da qualidade superficial no fresamento de aço p20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrirrefrigerantes. Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, RS, 103p, 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.

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

REBEYKA, Claudemir José. **Princípios do processo de fabricação por usinagem**. 1. ed. Curitiba, PR: Editora Intersaberes, 2016.

RECH J., Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool—chip interface in orthogonal dry turning. **Surface & Coatings Technology**, 200:5132–5139, 2006.

RODRÍGUEZ C. J. C., Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. Tese de Doutorado, Universidade de Kassel, Alemanha. 205p., 2009.

SANDVIK COROMANT. **Treinamento Catálogo**: Tecnologia em usinagem. Suécia. AB Sandvik Coromant, 2019.

SHAW, M. C. Metal cutting principles. New York: Oxford Science, 1997. 594 p

SILVA, L. E.; CONSALTER, L. A.; HAUPT, W.; SOUZA, A. J. .Efeito da mesogeometria da broca e das condições de lubrirrefrigeração sobre o acabamento do furo em aço ARBL DIN S700MC. Materia-Rio de Janeiro, v. 24, p. 15, 2019.

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

SOMMER H., Untersuchung von Schneidkanten-architekturen im Bezug auf den Zerspanprozess. Giesserei Technik Kassel, 2013.

STANGO, Robert J.. Filamentary brushing tools for surface finishing applications. **Metal Finishing**, [s.l.], v. 97, n. 1, p.83-92, jan.1999.

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

STEMMER C. E., Ferramentas de corte I. 6. ed. Florianópolis: UFSC/FEPESE, 2v. 2005.

TEIXEIRA, C. R., Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos furos produzidos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 109 p, 1995.

TIKAL F., Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden. **Kassel University Press**, 2009.

VOPÁT, Tomáš; SAHUL, Martin; HARŠÁNI, Marián; VORTEL, Ondrej; ZLÁMAL, Tomáš. The Tool Life and Coating-Substrate Adhesion of AlCrSiN-Coated Carbide Cutting Tools Prepared by LARC with Respect to the Edge Preparation and Surface Finishing. **MDPI** • **Journals**, Basel, Switzerland, p. 1-18, 2020.

ZEILMANN, R.P.; VACARO, T.; REIS, E.S.; WESTPHAL, C.J. Desempenho de fresas de aço-rápido após tratamento superficial. **Anais do 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Itatiaia, RJ, 2013.

ANEXO A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL

Tabela 1 – Composição química aço AISI P20

Elemento Teor (%)	С	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	0,409	0,377	1,462	0,022	0,384	2,033	0,201	0,716
	Co	Cu	N	Ti	V	W	A1	Fe
	0,108	0,119	0,026	0,004	0,049	0,088	0,012	93,983

Fonte: Laudo Técnico UCS (2019).