

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**

**RICARDO BOGO**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DO GUME POR POLIMENTO COM ESCOVAS  
DE CERDAS ABRASIVAS SOBRE A VIDA DA FERRAMENTA PARA O  
PROCESSO DE FRESAMENTO**

**CAXIAS DO SUL  
2021**

**RICARDO BOGO**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DO GUME POR POLIMENTO COM ESCOVAS  
DE CERDAS ABRASIVAS SOBRE A VIDA DA FERRAMENTA PARA O  
PROCESSO DE FRESAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso da disciplina de TCC II (EMT0224DC), apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Materiais.  
Área de concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**CAXIAS DO SUL  
2021**

**RICARDO BOGO**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DO GUME POR POLIMENTO COM ESCOVAS  
DE CERDAS ABRASIVAS SOBRE A VIDA DA FERRAMENTA PARA O  
PROCESSO DE FRESAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso da disciplina de TCC II (EMT0224DC), apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Materiais.  
Área de concentração: Projeto e Fabricação

**Aprovado em:** 15 de dezembro de 2021

**Banca Examinadora**

---

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

---

Prof. Me. Leandro Corso  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. Rafael Dallegrave Conrado  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

*“Se, a princípio, a ideia não é absurda, então não  
há esperança para ela.”  
(Albert Einstein)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente ao meu filho, Pedro Antonio Bogo, que me deu o real significado da vida. A minha esposa Adriana Libano Moreira caminhando ao meu lado a 17 anos. Aos meus pais, Antonio e Udete Bogo por acreditarem em mim e no meu potencial, a simplicidade e aos valores de vida a mim passados, sempre serei um colono na essência. Ao meu irmão e companheiro de vida Rodrigo Bogo.

Ao Prof. Rodrigo P. Zeilmann, meu orientador, pela dedicação, pelos ensinamentos e por ter me guiado durante esse desafio, confiando no meu trabalho.

A Universidade de Caxias do Sul, por permitir a realização dos testes experimentais em seus laboratórios e por colocar à disposição todos os equipamentos e materiais necessários para a validação dos resultados.

Aos funcionários da UCS e aos integrantes do Grupo de Usinagem, em especial ao João Davi Schenkel que me ajudou com as medições, validações e comprovação dos resultados.

A empresa Secta Tools e ao Eng. Bruno, por realizar as reafiações nas ferramentas propostas.

A todas as pessoas que fizeram parte da minha vida acadêmica, profissional e pessoal, cada ensinamento e aprendizado, muito obrigado. As pessoas que não me ajudaram por algum motivo, me induzindo ao erro, ou que propositalmente fizeram isto, agradeço de coração, a cada erro que cometi achei uma forma de não resolver tal questão, a cada erro estou mais perto da solução do problema proposto.

## RESUMO

A usinagem é um processo em constante evolução, a procura por maior produtividade, confiabilidade e qualidade dos materiais usinados é fundamental para a constante evolução do processo. A condição do gume das ferramentas é de grande importância para o desempenho da ferramenta na usinagem, o gume de uma ferramenta depois do processo de fabricação ou reafiação possui defeitos como: microtrincas, irregularidades e um gume extremamente afiado. O tratamento de gume é o processo utilizado com o objetivo de remover estes defeitos, que são oriundos dos processos de fabricação e reafiação das ferramentas. Diante destes pontos elencados este trabalho tem como objetivo compreender e avaliar os efeitos do tratamento de gume por escovas de cerdas abrasivas, levando em consideração a evolução dos desgastes no gume e vida útil da ferramenta no processo de fresamento de topo. As escovas abrasivas abordadas neste trabalho são escovas técnicas da marca 3M, estas escovas possuem grãos de diferentes granulometrias e dois diferentes abrasivos, carbetto de silício (SiC) e óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), suas cerdas são compostas por nylon de duas diferentes espessuras. Baseando-se na literatura a fase de pré-testes teve como objetivo avaliar o desempenho destas escovas, pontos como rugosidade, avaliação das cerdas e contorno do gume foram abordados nesta etapa, e como resultado a escova de cerda fina com granulometria de 1 micrão de SiC teve o melhor desempenho, estas escovas produziram um raio de 0,06 mm nos gumes das ferramentas. Foram tratadas duas ferramentas pelo processo de polimento, estas ferramentas passaram pelo processo de fresamento em aço AISI P20, como resultado as ferramentas tratadas tiveram um desempenho superior em 15,30 % comparando com ferramentas sem tratamento. O tratamento de gume proporcionou além do aumento de vida útil um desgaste de flanco linear, retardando a presença de desgastes como adesão, microtrincas e microlascamentos. O tratamento de gume por polimento com escovas com cerdas abrasivas se mostra um processo eficaz e confiável para melhorar o desempenho das ferramentas de usinagem.

**Palavras-Chave:** Fresamento de Topo Reto. Polimento. Escovas com cerdas abrasivas. Desgaste. Vida útil da ferramenta.

## ABSTRACT

Machining is a process in constant evolution, the search for greater productivity, reliability and quality of machined materials is fundamental for the constant evolution of the process. The state of the tool edge is of great importance for the performance of the tool in machining, the edge of a tool after the manufacturing or re-sharpening process has defects such as: micro-cracks, irregularities and an extremely sharp edge. Cutting edge treatment is the process used to remove these defects, which originate in the tool manufacturing and re-sharpening processes. In view of these listed points, this work aims to understand and evaluate the effects of the treatment of the cutting edge by abrasive bristle brushes, taking into account the evolution of edge wear and the tool life in the milling process. The abrasive brushes covered in this work are technical brushes from the 3M brand, these brushes have different grain sizes and two different abrasives, silicon carbide (SiC) and aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), their bristles are made of nylon of two different thicknesses. Based on the literature, in the pre-test phase that aimed to evaluate the performance of these brushes, points such as roughness, evaluation of the bristles and edge contour were addressed in this step, and as a result the fine bristle brush with a particle size of 1 micron SiC had the best performance, these brushes produced a radius of 0,06 mm at the tool edges. Two tools were treated by the polishing process, these tools went through the milling process in AISI P20 steel, with that the treated tools had a superior performance by 15,30% in relation to the untreated tools. The cutting edge treatment provided, in addition to increasing the useful life, a linear flank wear, delaying the presence of wear such as adhesion, microcracks and microchips. The polishing edge treatment with abrasive bristle brushes proves to be an effective and reliable process for improving the performance of machining tools.

**Keywords:** Straight End Milling. Polishing. Brushes with abrasive bristles. Wear. Tool life.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Fresamento concordante e discordante.....                         | 16 |
| Figura 2 – Fresas de topo .....  | 19 |
| Figura 3 - Terminologia das fresas de topo.....                              | 20 |
| Figura 4 – Número de cortes de uma fresa.....                                | 21 |
| Figura 5 – Geometria do gume.....  | 22 |
| Figura 6 – Parâmetros escova e ferramenta.....                               | 23 |
| Figura 7 – Escova abrasiva vertical.....                                     | 24 |
| Figura 8 – Escova abrasiva radial .....                                      | 25 |
| Figura 9 – Parâmetros para medição dos desgastes.....                        | 27 |
| Figura 10 – Esquema representativo das etapas dos testes experimentais ..... | 32 |
| Figura 11 – Montagem dos corpos de prova.....                                | 35 |
| Figura 12 – Especificações da ferramenta .....                               | 36 |
| Figura 13 – Processo de polimento.....                                       | 37 |
| Figura 14 – Escovas com cerdas abrasivas 3M (Bristle).....                   | 38 |
| Figura 15 – Análise do flanco dos gumes antes e depois do tratamento .....   | 43 |
| Figura 16 – Análise da face dos gumes antes e depois do tratamento .....     | 44 |
| Figura 17 – Análise das cerdas das escovas .....                             | 46 |
| Figura 18 – Comparação entre gumes.....                                      | 48 |
| Figura 19 – Mecanismo do tratamento de gume.....                             | 51 |
| Figura 20 – Comparação entre antes e após tratamento .....                   | 52 |
| Figura 21 – Evolução dos desgastes .....                                     | 57 |



## LISTA DE QUADROS TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 – Resumo dos pontos abordados nos pré-testes .....               | 49 |
| Tabela 1 – Comparação entre tratamentos de gume e tipos de materiais..... | 29 |
| Tabela 2 – Descrição das escovas por gume selecionado .....               | 42 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1 – Gráfico comparando vida útil da ferramenta nos diferentes tratamentos | 31 |
| Gráfico 2 – Gráfico de comparação de Ra .....                                     | 45 |
| Gráfico 3 – Curvas de desgaste .....  | 54 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |  |
|-----------|--|
| 3M        | Minnesota Mining and Manufacturing Company<br>(Empresa de Mineração e Manufatura de Minnesota) |
| AISI      | American Iron and Steel Institute<br>(Instituto Americano do Ferro e do Aço)                   |
| ABNT      | Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| $Al_2O_3$ | Óxido de alumínio  |
| ANSI      | American National Standards Institute<br>(Instituto Americano de Normas)                       |
| CBN       | Nitreto cúbico de boro   |
| CVD       | Deposição química de vapor   |
| ISO       | International Organization for Standardization<br>(Organização Internacional de Normalização)  |
| PCD       | Diamante policristalino  |
| PVD       | Deposição física de vapor  |
| SiC       | Carbeto de silício   |
| UCS       | Universidade de Caxias do Sul  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                  |  |
|------------------|--|
| °C               | graus Celsius  |
| μm               | micrometro   |
| ae               | profundidade de trabalho                             |
| ap               | profundidade de corte                                |
| d                | diâmetro da fresa                                    |
| fz               | avanço por dente                                     |
| h                | espessura de cavaco                                  |
| h <sub>min</sub> | espessura mínima de cavaco                           |
| HRC              | Hardness Rockwell C<br>(Dureza Rockwell na escala C) |
| K                | Fator de forma de arredondamento                     |
| KB               | largura do desgaste de cratera                       |
| KM               | distância do centro do desgaste de cratera à gume    |
| KT               | profundidade do desgaste de cratera                  |
| kW               | quilowatt  |
| l                | comprimento de escovação                             |
| l1               | comprimento de corte                                 |
| l2               | comprimento total da fresa                           |
| m/s              | metros por segundo                                   |
| nº               | número   |
| r                | raio   |
| rpm              | rotações por minuto                                  |
| t                | tempo  |
| v                | velocidade de rotação                                |
| VB               | desgaste de flanco médio                             |
| VBC              | desgaste de ponta                                    |
| VBmax            | desgaste de flanco máximo                            |
| VBN              | desgaste de entalhe                                  |
| vc               | velocidade de corte                                  |
| Vf               | velocidade de avanço                                 |
| α0               | ângulo de incidência ou folga                        |
| β0               | ângulo da cunha de corte                             |
| γ0               | ângulo de saída                                      |
| γe               | ângulo de saída efetivo                              |
| ε                | ângulo de mergulho                                   |

## SUMÁRIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>14</b> |
| 1.1          | JUSTIFICATIVA .....   | 14        |
| 1.2          | OBJETIVO GERAL.....   | 15        |
| 1.3          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 15        |
| <b>2.</b>    | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | <b>16</b> |
| 2.1          | FRESAMENTO.....   | 16        |
| 2.2          | FRESAS DE TOPO .....  | 17        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Geometria da ferramenta</b> .....                                      | <b>19</b> |
| 2.3          | TRATAMENTO DE GUME .....  | 21        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Polimento por cerdas abrasivas de Nylon</b> .....                      | <b>22</b> |
| 2.4          | DESGASTES.....  | 26        |
| <b>2.4.1</b> | <b>Tratamento de gume e a influência na vida útil da ferramenta</b> ..... | <b>28</b> |
| <b>3.</b>    | <b>METODOLOGIA</b> .....  | <b>32</b> |
| 3.1          | PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....   | 32        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Definições iniciais</b> .....  | <b>33</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>Variáveis de Entrada</b> .....   | <b>33</b> |
| <b>3.1.3</b> | <b>Variáveis de Saída</b> .....   | <b>34</b> |
| <b>3.1.4</b> | <b>Material para corpo de prova</b> .....                                 | <b>34</b> |
| <b>3.1.5</b> | <b>Ferramentas</b> .....  | <b>35</b> |
| <b>3.1.6</b> | <b>Equipamentos</b> .....   | <b>36</b> |
| 3.2          | POLIMENTO POR ESCOVAS COM CERDAS ABRASIVAS .....                          | 36        |
| 3.3          | PRÉ-TESTES .....  | 37        |
| 3.4          | TESTES EXPERIMENTAIS .....  | 39        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS</b> .....   | <b>41</b> |
| 4.1          | PRÉ-TESTES .....  | 41        |
| <b>4.1.1</b> | <b>Escovas abrasivas</b> .....  | <b>41</b> |
| <b>4.1.2</b> | <b>Avaliação do tratamento por imagens</b> .....                          | <b>42</b> |
| <b>4.1.3</b> | <b>Rugosidade</b> .....   | <b>44</b> |
| <b>4.1.4</b> | <b>Avaliação das cerdas</b> .....   | <b>45</b> |
| <b>4.1.5</b> | <b>Contorno do gume</b> .....   | <b>47</b> |
| <b>4.1.6</b> | <b>Conclusão dos pré-testes</b> .....                                     | <b>49</b> |
| 4.2          | TRATAMENTO DE GUME COM A ESCOVA SELECIONADA .....                         | 50        |
| <b>4.2.1</b> | <b>Avaliação do tratamento</b> .....                                      | <b>51</b> |
| 4.3          | TESTE DE USINAGEM.....  | 53        |
| <b>4.3.1</b> | <b>Vida útil das fresas na usinagem</b> .....                             | <b>53</b> |
| <b>4.3.2</b> | <b>Avaliação dos desgastes</b> .....                                      | <b>56</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÃO</b> .....  | <b>58</b> |
| <b>6</b>     | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....                             | <b>59</b> |
|              | REFERÊNCIAS.....  | 60        |

## 1 INTRODUÇÃO

Quando o tema usinagem é colocado em pauta, uma série de fatores, premissas e variáveis nos rodeiam, como requisitos de qualidade do produto acabado, diminuição nos custos, produtividade, capacidade de usinar novos materiais, precisão, confiabilidade entre outros, um processo em busca de constante evolução. Para tal máquinas e equipamentos de usinagem surgem para acompanhar esta exigência de mercado, nesta mesma toada as ferramentas de usinagem exercem um papel central nesta evolução.

Neste mercado cada vez mais competitivo a busca pela produtividade com o custo cada vez menor leva a aplicação de métodos para melhorar os processos de usinagem, assim como a busca para conseguir aumentar a vida útil da ferramenta. Estas necessidades culminaram no desenvolvimento de ferramentas cada vez mais duráveis e precisas.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Na fabricação de ferramentas de usinagem existem defeitos típicos na região do gume, defeitos recorrentes do processo de produção, como rebarbas, micro trincas e irregularidades. O processo de preparação de gume após a ferramenta pronta, surge para contornar estes problemas recorrente do processo de fabricação, eliminando defeitos e irregularidades, sendo uma região primordial para a vida útil da ferramenta, assim criando uma geometria mais bem definida e favorável para sua finalidade (RODRIGUEZ, 2009). Ferramentas podem ser finalizadas com o processo de preparação de gume, estas tecnologias podem fornecer um raio de gume de corte arredondado, aliviando as tensões.(UHLMANN et al., 2016).

Um ponto a se observar e avaliar é qual o benefício que o tratamento de gume pode trazer para a integridade da ferramenta, pois uma superfície que não favoreça o desempenho da ferramenta pode levar a tensões maiores, super aquecimento e por consequência ruptura na ferramenta e/ou material usinado. A integridade da superfície descreve as alterações produzidas na camada superficial durante a usinagem (BORDIN; ZEILMANN, 2014).

Um dos processos mais promissores para a preparação de gume é o por escovas com cerdas abrasivas, processo que facilmente pode ser adaptado na fabricação de ferramentas, devido sua alta flexibilidade em geometrias, diferentes granulometrias e baixo investimento em ferramental, entretanto, no mercado existe inúmeras opções para várias finalidades, mas nada específico para o processo de preparação de gume.

O processo de preparação de gume gera benefícios a ferramenta, no presente trabalho aborda-se estes benefícios através das medições em técnicas laboratoriais, conhecer os resultados práticos na vida útil da ferramenta, acabamento superficial dos materiais usinados e velocidade de corte.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo central deste trabalho foi compreender e avaliar os efeitos do tratamento de gume por escovas de cerdas abrasivas, levando em consideração a evolução dos desgastes e vida útil da ferramenta no processo de fresamento de topo.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os seguintes objetivos específicos foram alcançados:

- a) Caracterizar a ferramenta após a aplicação de tratamentos de gume por polimento com cerdas abrasivas.
- b) Analisar a rugosidade e contorno de gume da ferramenta após tratamento de gume.
- c) Analisar os desgastes e vida útil das ferramentas para as ferramentas tratadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FRESAMENTO

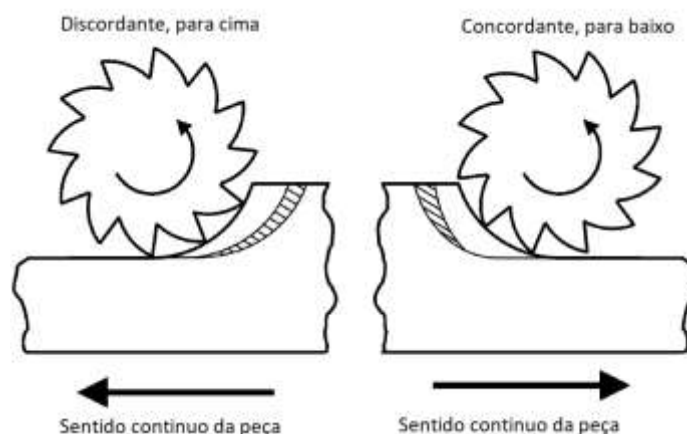
Uma operação de usinagem compreende aquelas que conferem a peça forma, dimensões e acabamento, podendo ser uma destas variáveis ou uma combinação das mesmas produzindo cavaco (FERRARESI, 1977).

O fresamento é a operação de usinagem, no qual usa-se uma ferramenta chamada fresa, constituída por arestas cortantes também chamadas de gumes, o movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor de seu eixo (DINIZ et al., 1999). A remoção de material da peça ocorre de modo intermitente, pelo movimento de rotação e translação da ferramenta obtendo superfícies de diversas geometrias.

O processo de fresamento pode ser dividido em dois tipos principais, frontal e tangencial. Fresamento frontal destinado a obtenção de peças perpendiculares ao eixo de rotação da ferramenta. Fresamento tangencial para obtenção de peças paralelas ao eixo de rotação da ferramenta. Podendo no mesmo caso os dois processos serem simultâneos (FERRARESI, 1977).

O fresamento dependendo da direção e do avanço de corte, que por sua vez podem ser categorizados por fresamento concordante, ou para baixo, e discordante, ou para cima, e ambos ao mesmo tempo, o que os difere é a direção do movimento de corte em relação à rotação da ferramenta de corte. Na Figura 1 os dois tipos são ilustrados.

Figura 1 - Fresamento concordante e discordante



Fonte: Adaptado de NEE (2015).



O resultado do fresamento são ações de corte diferentes, denominadas fresamento discordante e concordante. No fresamento discordante ou para cima, o cavaco começa muito fino e cresce no decorrer da usinagem. Na fresagem concordante ou para baixo, o cavaco gerado inicialmente é mais grosso, reduzindo ao longo do corte. O comprimento de um cavaco na fresagem para baixo é menor do que na fresagem para cima (MIKELL P. GROOVER, 2007; KLOCKE, 2011).

Na prática significa que a ferramenta quando trabalha de modo concordante tende a favorecer a cinética de corte, durante o corte a força que a ferramenta exerce sobre a peça é melhor absorvido pela mesa, gerando menos vibrações e esforços mecânicos para o processo de fresamento, em outras palavras a peça é pressionada contra a mesa da fresadora, no fresamento discordante a peça sofre esforços para sair da mesa da fresadora. Como consequência o modo concordante traz benefícios como, vida mais longa da ferramenta, menor desgaste da ferramenta e máquina, menor força e potência de avanço.

## 2.2 FRESAS DE TOPO

A ferramenta que hoje conhecemos como fresa teve sua origem na França. Suas primeiras unidades foram fabricadas por Jacques de Vaucanson, estima-se que antes de 1780, possuíam dentes finos, provavelmente feitos por uma talhadeira. Devido ao formato ovalado, e ao seu redor possuir saliências e ressaltos, a ferramenta acabou sendo batizada como fresa, que na língua espanhola quer dizer morango (ELBESTAWI, 1998).

Alguns requisitos são fundamentais para uma ferramenta de usinagem, são elas: resistência mecânica, dureza a quente e resistência ao desgaste. Resistência mecânica para evitar a falha por fratura, o material da ferramenta deve possuir alta tenacidade, a tenacidade é a capacidade de um material de absorver energia sem falhar, combinação de resistência e ductilidade do material. Dureza a quente é a capacidade de um material de reter sua dureza em altas temperaturas, isso é necessário devido ao ambiente de altas temperaturas em que a ferramenta é submetida. Resistência ao desgaste é a propriedade mais importante necessária para resistir o desgaste abrasivo, todos os materiais da ferramenta de corte devem ser duros (MIKELL P. GROOVER, 2007).

Os materiais para a confecção de ferramentas mais usuais são os aços rápido e o metal duro.

O aço rápido se destaca pelas altas durezas a frio, quando submetido a altas temperaturas tem boa resistência, também por possuir boa tenacidade. O metal duro se aplica a maioria das operações de usinagem, podendo usinar desde um latão mole até um ferro fundido branco com dureza de 60 Rockwell C, chegando a usinar aços temperados, impossíveis de serem usinados por aço rápido, possui alta dureza, alta dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade. Devido as suas propriedades citadas aliadas a variedade de formas e dimensões, fazem o metal duro o material de usinagem mais importante (FERRARESI, 1977).

Na sua essência o metal duro é constituído por um carboneto e um ligante, produzido através da metalurgia do pó.

O carboneto de tungstênio é amplamente utilizado para a fabricação de ferramentas de usinagem, assim como o cobalto que tem a função de ligante. Também temos metais duros compostos por mais de um carboneto, como por exemplo a adição do carboneto de titânio para aumentar a resistência da ferramenta, outros exemplos são os carbonetos de tântalo e de nióbio, ambos diminuem o tamanho de grão, melhorando a tenacidade da ferramenta (STEMMER, 2005).

Processos como CVD (Deposição química de vapor) e PVD (deposição física de vapor) são usados nas fresas de topo para conferirem maior resistência mecânica, resultando em uma maior vida útil. Assim como busca-se o menor tamanho de grão, quanto mais finos os carbonetos, maior será a tenacidade da ferramenta, e a dureza média da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

As fresas de topo podem ser utilizadas para inúmeros processos dentro da usinagem, como facear, desbaste, esquadrejamento de peças, usinar cavidades complexas, rebaixos, matrizes, ranhuras, gravações, rasgos e ainda fresar contornos. O processo caracteriza-se principalmente pela excentricidade, a deflexão e as vibrações durante a usinagem (DROZDA e WICK, 1983; NEE, 2015).

A fresa de topo é uma ferramenta inteiriça rotativa utilizada no processo de usinagem. Essa ferramenta é composta de uma série de dentes ou gumes de corte, que ficam distribuídos ao redor de um eixo, que são usados para cortar e moldar as peças deixando-as no formato e nas dimensões desejadas. Na Figura 2 alguns exemplos de fresas de topo.

Figura 2 – Fresas de topo

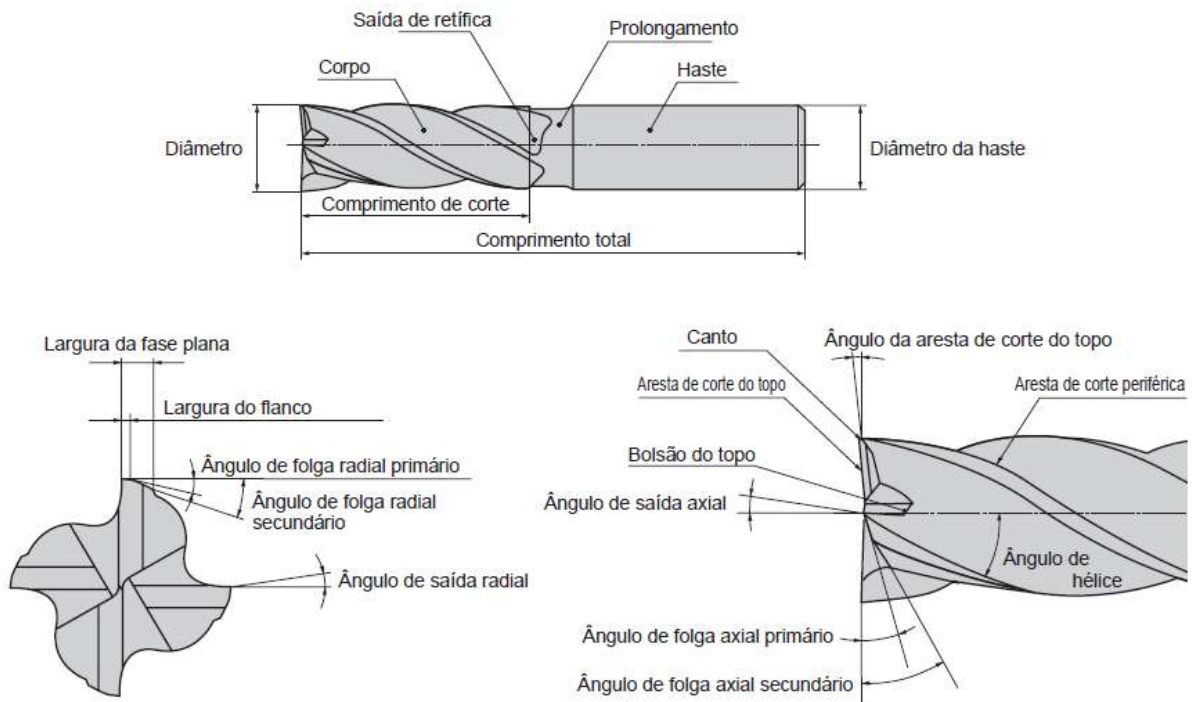


Fonte: NEE (2015).

### 2.2.1 Geometria da ferramenta

As fresas de topo são extremamente versáteis e podem ser usadas para realizar quase todas as operações de fresamento, no entanto, devido as geometrias complexas e custo elevado de material e fabricação, as fresas de topo geralmente possuem uma dimensão pequena (NEE, 2015). Na Figura 3 é ilustrada a terminologia das fresas de topo.

Figura 3 - Terminologia das fresas de topo



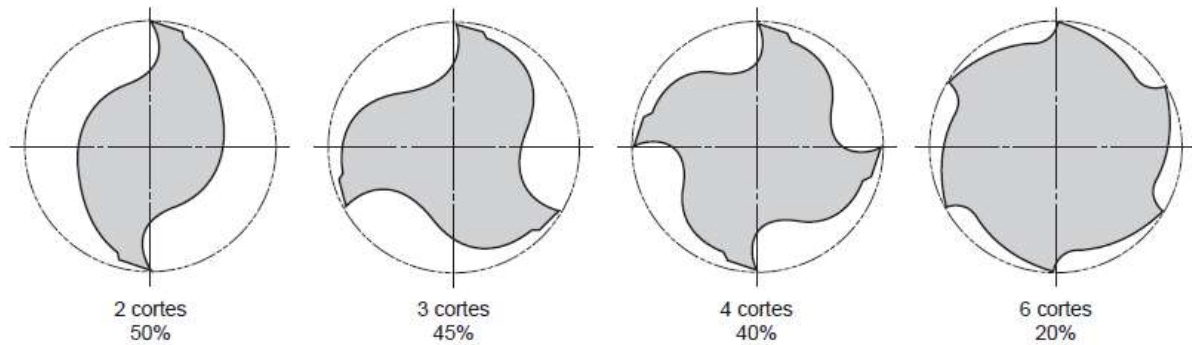
Fonte: Adaptado de Mitsubishi Materials (1999).

A fresa de topo é uma ferramenta multi-cortante, que tem um número variável de cortes ou gumes. Há alguns fatores que podem ajudar na determinação do número ideal de cortes, para cada tipo de operação:

- O material a ser usinado e tamanho da peça.
- A estabilidade do sistema utilizado, fresadora.
- A potência disponível na máquina.
- O acabamento desejado.

Na Figura 4 mostra os diferentes tipos de fresas de topo, em relação ao número de cortes ou gumes. O número de gumes influencia no acabamento da superfície gerada, como também a força, a potência de corte, a vida da ferramenta e o tempo de corte.

Figura 4 – Número de cortes de uma fresa



Fonte: Adaptado de Mitsubishi Materials (1999).

Fresas com maior número de cortes se caracterizam por alta rigidez e baixo escoamento de cavaco, aplica-se a materiais com alta dureza. Fresas com menos cortes se caracterizam pelo alto escoamento de cavaco, amplamente usadas para acabamento e desbaste de materiais diversos.

### 2.3 TRATAMENTO DE GUME

O tratamento de gume é um processo usado após o processo de retificação da ferramenta. É usado para reduzir as falhas resultantes da retificação, e gerar uma geometria de gume específica que seja apropriada para a aplicação da ferramenta de corte. A adesão de um revestimento aplicado posteriormente ao tratamento de gume também é aumentada, se deve ao formato arredondado e mais regular do gume preparado (AURICH; EFFGEN; KIRSCH, 2016; DENKENA; KÖHLER; VENTURA, 2013; KREBS et al., 2018).

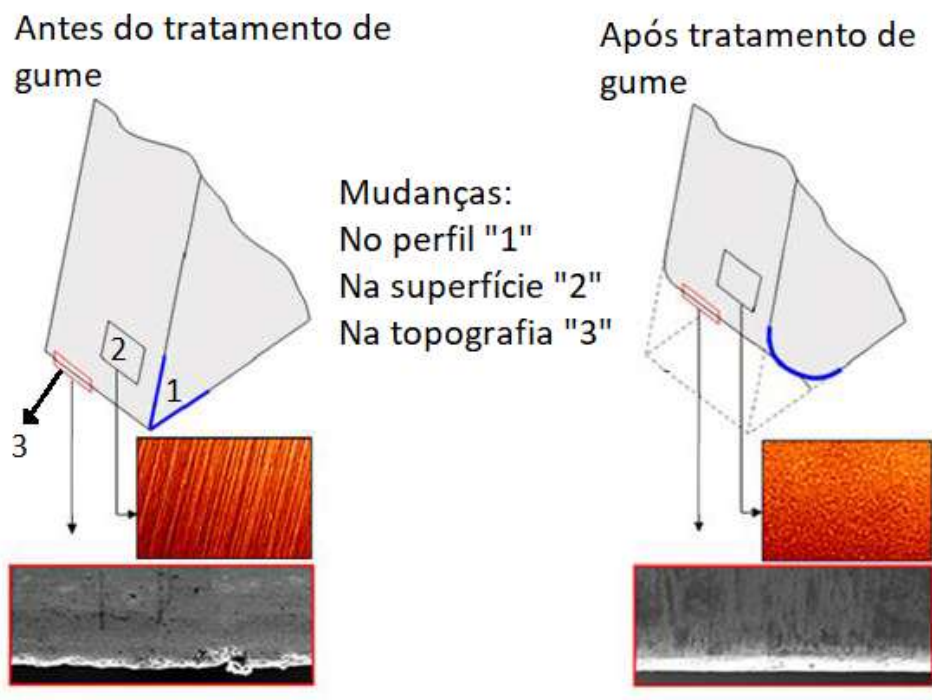
A geometria da ferramenta pode ser dividida em macro, meso e microgeometria. A macrogeometria compreende os ângulos de corte, raios de quina, quebra-cavacos e outras funções relacionadas ao fluxo de cavacos, também é parte importante para o resfriamento e lubrificação da ferramenta. Na mesogeometria são consideradas os contornos correspondentes à superfície convexa do gume, gerada pelo processo de tratamento de gume. Na microgeometria se encontra a microtopografia do gume e sua superfície (RODRÍGUEZ, 2009).

A adequada preparação de gume é um dos básicos ingredientes para uma ferramenta ter êxito no seu propósito. O tratamento de gume tem como objetivo gerar uma geometria favorável no gume, alterando a microtopografia, a rugosidade e

a textura das superfícies e gumes da ferramenta, a fim de prolongar a vida útil da ferramenta (RODRÍGUEZ, 2009).

Tratamento de gume consiste em gerar geometria controlada modificando a microtopografia, controlando a rugosidade e a textura da superfície da ferramenta. A consequência é a redução dos defeitos e reforço da borda, a fim de melhorar o desempenho, a confiabilidade da ferramenta e a qualidade da superfície usinada (BORDIN; ZEILMANN, 2014). Na Figura 5 temos a comparação entre um gume afiado e após tratamento.

Figura 5 – Geometria do gume



Fonte: Adaptado de RODRÍGUEZ (2009).

### 2.3.1 Polimento por cerdas abrasivas de Nylon

Os abrasivos como rebolos diamantados, correias de lixas entre outros fazem parte da fabricação e afiação de ferramentas de usinagem, nesta gama de abrasivos temos a família de escovas de nylon impregnadas com mineral abrasivo, este tipo de abrasivo pode ser usado para o tratamento de gume da ferramenta.

Uma combinação entre polimento e escovação é usada para a preparação de gume, esta combinação pode ser considerado um caso especial de polimento,

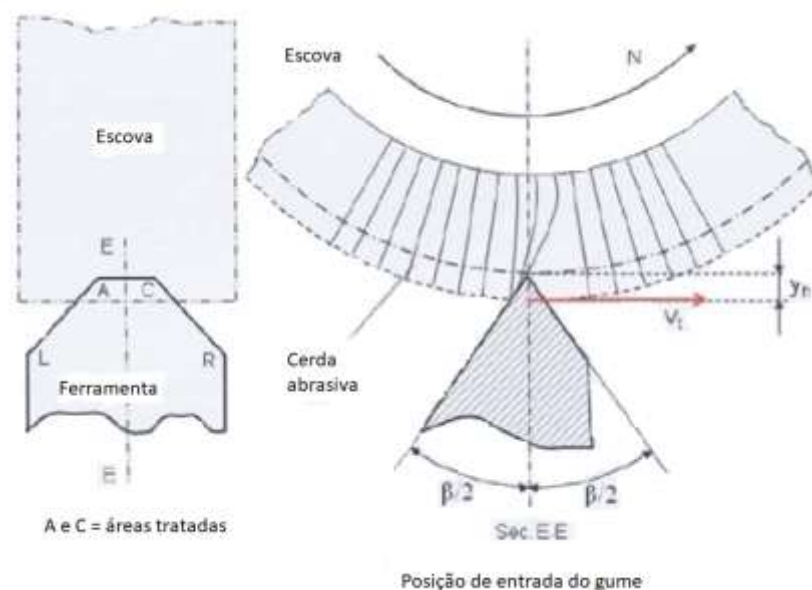
aonde a remoção de material é mínima, produzindo raios definidos de 0,005 a 0,15 mm (RODRÍGUEZ, 2009).

As escovas com cerdas de nylon são impregnadas com grãos abrasivos, responsáveis pela abrasão na superfície do gume, comumente os abrasivos utilizados são o carbeto de silício (SiC), o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), o nitreto cúbico de boro (CBN) e o PCD (diamante policristalino).

Entretanto, poucas informações são encontradas na literatura sobre os mecanismos envolvidos durante a remoção de material por esse processo, devido à grande dificuldade de caracterizar a interação complexa que ocorre na interface da cerda abrasiva com a peça (OVERHOLSER; STANGO; FOURNELLE, 2003; RODRÍGUEZ, 2009).

O desempenho das escovas abrasivas está relacionado a fatores como: velocidade da escova, tipo e tamanho de grão impregnado, tempo de contato com a ferramenta entre outras. Em estudo realizado por (NIKISHECHKIN; GRIGORIEV; CHERVONNOVA, 2019) prevê como um hardware e um software precisam operar, para que possamos automatizar o processo de polimento por cerdas abrasivas, no estudo é abordado premissas necessárias para que o processo se torne confiável e com repetitividade. Na Figura 6 observa-se alguns parâmetros da escova e da ferramenta.

Figura 6 – Parâmetros escova e ferramenta

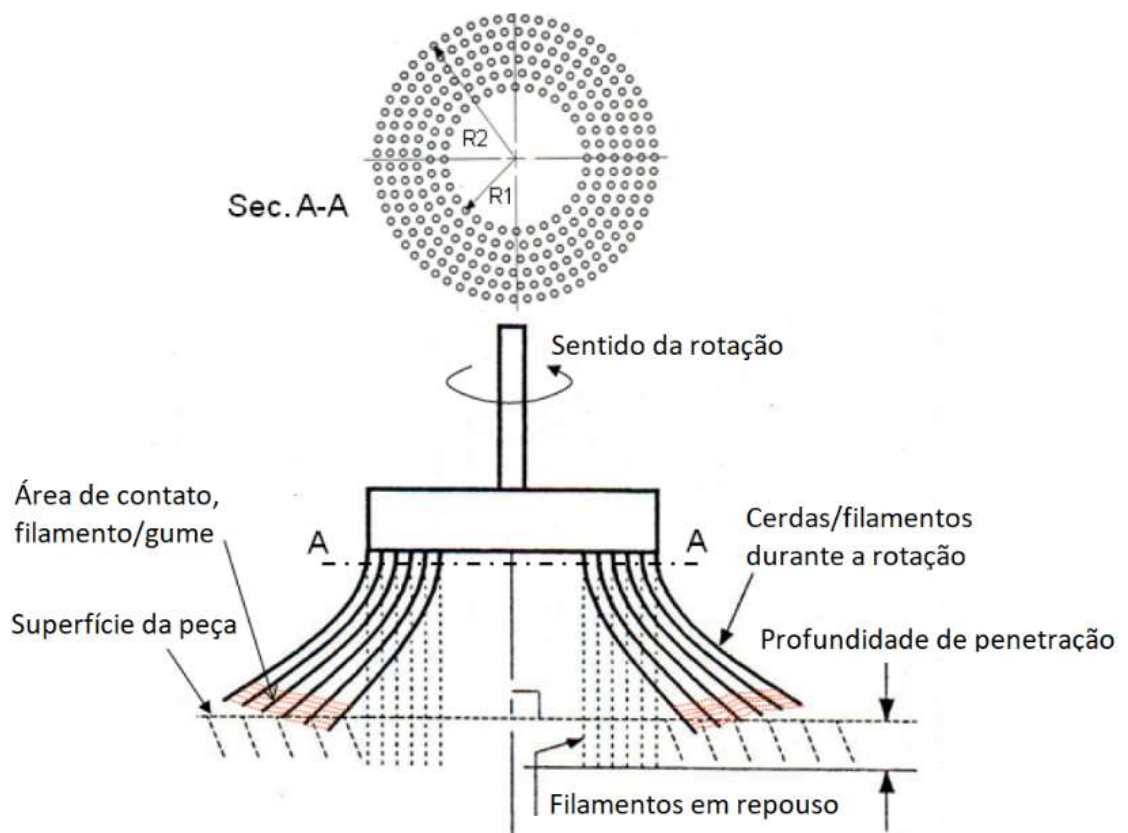


Fonte: Adaptado de NIKISHECHKIN; GRIGORIEV; CHERVONNOVA, (2019).

Duas formas de escovas com cerdas de nylon impregnadas com grão abrasivo são encontradas no mercado. A primeira na Figura 7 na forma de escova vertical, observa-se o deslocamento das cerdas, quando a escova está estática as cerdas ficam perpendiculares, quando colocadas em uso ganham velocidade periférica, aumentando seu raio de atuação.

Esta forma de abrasivo é fixada na haste da ferramenta pela extremidade, pelo eixo de rotação, as máquinas mais utilizadas para este processo são retificas angulares, ou máquinas projetadas para este uso. Os formatos encontrados têm diâmetros de 50 mm, 75 mm e 115 mm, com a altura de 12,4 mm. As rotações de trabalho diminuem conforme o diâmetro aumenta, partindo de 12.000 rpm para uma escova de 115 mm de diâmetro, para 25.000 rpm para escovas com 50 mm de diâmetro.

Figura 7 – Escova abrasiva vertical

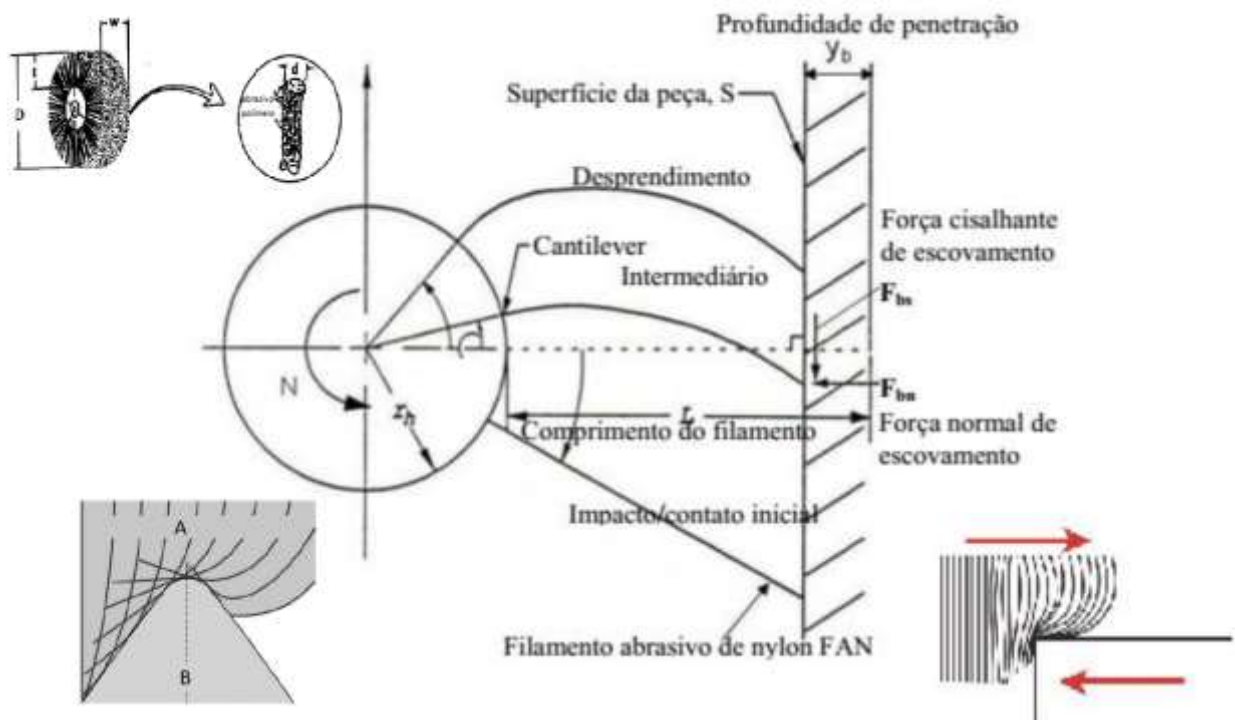


Fonte: Adaptado de RODRÍGUEZ (2009).



Outra forma de polimento é com filamentos radiais, no qual a fixação é feita pelo centro da escova. Estas escovas possuem tamanhos de 50 mm, 76 mm e 152 mm de diâmetro, sua largura dependerá de quantas escovas são postas em conjunto, da mesma forma que as verticais quanto menor o diâmetro maior a rotação máxima de trabalho, partindo de 10.000 rpm até 30.000 rpm. Nesta forma os filamentos ficam expostos nas extremidades da escova, ilustrados na Figura 8.

Figura 8 – Escova abrasiva radial



Fonte: Adaptado de Ost (2016); OVERHOLSER; STANGO; FOURNELLE (2003)

O grão abrasivo impregnado em algumas destas escovas é composto por óxido de alumínio tratado termicamente. O tratamento térmico confere ao grão de óxido de alumínio uma estrutura cristalina planejada, sua quebra produz mais pontas cortantes que um mineral sem tratamento, o grão se renova melhor e mais uniformemente, o seu poder de corte acaba aumentando e por consequência sua resistência ao desgaste. Possui estrutura cristalina fina e muito mais uniforme, proporcionando um mineral mais estável e de qualidade, com maior repetibilidade, elevando sua vida útil em aplicações de afiação, acabamento e polimento.

Os grãos abrasivos seguem a Norma ANSI (*American National Standards Institute*), partem de uma granulometria 80 até 1 micron, para tratamento de gume

os grãos mais finos possuem um desempenho melhor, já que a remoção de material é mínima.

## 2.4 DESGASTES

O desgaste da ferramenta é inerente ao processo de usinagem. As ferramentas de usinagem estão expostas a altas cargas mecânicas e altas temperaturas durante o processo de usinagem.

Na usinagem aplica-se altas forças e temperaturas durante o processo, criando um ambiente muito hostil para a ferramenta. Se a força de corte se tornar muito alta, a ferramenta pode falhar. Se a temperatura durante a fresagem estiver muito alta, o material da ferramenta perde seu poder de corte e falha. Se nenhuma dessas condições acontecer, com o passar do tempo o desgaste do gume de corte leva a falha (MIKELL P. GROOVER, 2007).

Segundo (FERRARESI, 1977; DINIZ et al., 1999; MACHADO et al., 2015) considera-se como desgastes da ferramenta: desgastes de flanco, de cratera, de entalhe e as deformações plásticas. Assim como as avarias nas ferramentas, como lascamentos, trincas e quebras.

O desgaste de flanco ocorre quando o gume sofre alterações, como perda de material e recuo, este desgaste ocorre na superfície de folga da cunha de corte, devido ao contato ferramenta e peça, prejudicando o acabamento superficial da peça. O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito da ferramenta com o cavaco, o crescimento desse desgaste gera a quebra da ferramenta. O desgaste de entalhe ocorre na interface entre peça, ferramenta e cavaco, no lado oposto da superfície de corte, resultado da ação das rebarbas produzidas nas extremidades do cavaco, envolvendo um mecanismo de aderência e arrancamento. As deformações plásticas ocorrem quando é aplicada altas forças a ponta da ferramenta somada a altas temperaturas, essas deformações causam deficiência no controle do cavaco e aumento da rugosidade da peça usinada (DINIZ et al., 1999; MACHADO et al., 2015).

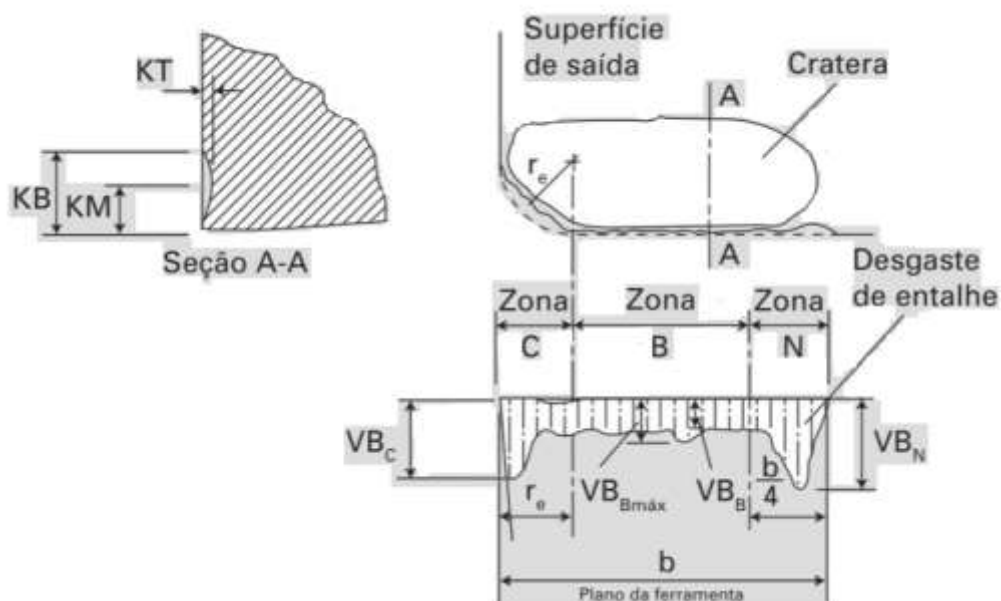
As trincas são avarias causadas pelas variações na temperatura que são perpendiculares ao gume, e/ou variações nos esforços mecânicos paralelas ao gume. Lascamento por sua vez é um tipo de avaria aonde pedaços da ferramenta se desprendem do gume, provocando severa diminuição da vida útil da ferramenta, o

lascamento ocorre quando a ferramenta já possui uma avaria como a trica e a adesão, o lascamento é uma avaria típica do processo de fresamento, devido ao corte interrompido, choques mecânicos e térmicos inerentes ao processo. A adesão está relacionada a baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, formando entre a ferramenta e a peça um extrato metálico extremamente aderente a ferramenta, ao tentar se desprender da ferramenta o extrato provoca o lascamento ou microlascamento. (DINIZ et al., 1999; MACHADO et al., 2015).

As quebras na maioria das vezes estão atreladas ao acúmulo dos desgastes e/ou avarias citados acima, porém uma ferramenta pode quebrar inesperadamente, isso ocorre quando a carga sobre a ferramenta é excessiva, no corte interrompido, na parada instantânea do movimento de corte ou no entupimento dos canais de expulsão do cavaco (MIKELL P. GROOVER, 2007; DINIZ et al., 1999).

Antes que uma das formas de desgaste ou a soma delas acabe resultando na quebra da ferramenta, ou no comprometimento das tolerâncias e acabamento superficial da peça, é necessário que a ferramenta seja substituída. Para quantificar esses desgastes é usado a Norma ISO 3685 (1977), aonde ( $KT$ ) é a profundidade, ( $VB_b$ ) desgaste de flanco médio, ( $VB_{máx}$ ) desgaste de flanco máximo, ( $VB_n$ ) desgaste de entalhe, ( $VB_c$ ) desgaste de ponta (MACHADO et al., 2015). Na Figura 9 os parâmetros para medição dos desgastes da ferramenta são ilustrados.

Figura 9 – Parâmetros para medição dos desgastes



Segundo (DINIZ et al., 1999) a velocidade de corte é o parâmetro que mais influência ao desgaste, pois com o aumento da velocidade ocorre o aumento da energia (calor) que é imposta ao processo, sem o aumento da área da ferramenta que recebe este calor.

A resistência ao desgaste no processo de fresamento de metais depende de mais do que apenas a dureza da ferramenta. Outra característica que afeta a resistência ao desgaste inclui o acabamento na superfície da ferramenta, uma superfície mais lisa significa um menor coeficiente de atrito (MIKELL P. GROOVER, 2007).

#### **2.4.1 Tratamento de gume e a influência na vida útil da ferramenta**

Tratamento de gume são alterações a nível quase microscópico. O efeito deste tratamento de gume é aumentar a resistência do gume, proporcionando uma transição mais gradual entre a ferramenta e a peça a ser usinada. (MIKELL P. GROOVER, 2007).





























O tratamento de gume tem como objetivo obter variações no raio, na forma do gume e rugosidade, estas alterações podem afetar as áreas próximas ao gume. O tratamento de gume pode influenciar positivamente o corte da ferramenta, aumentando a vida útil dela, assim como alterar variáveis como rugosidade final da peça usinada ou até mesmo nas forças aplicadas na usinagem. Entretanto, os tratamentos de gume podem não ter um impacto significativo ou até mesmo diminuir a vida da ferramenta.




Zeilmann et al. (2013), fresas de aço-rápido M2 com diâmetro de 6mm e 4 gumes foram submetidas ao tratamento de gume por arraste, foram submetidas ao fresamento de topo de um aço ABNT P20, e comparadas a fresas na condição inicial, sem tratamento de gume. Como resultado obtido não encontraram uma variação significativa da rugosidade, dado a dispersão dos valores experimentais. Os autores observaram também que a ferramenta não tratada gerou marcas de passagem mais bem definidas que a ferramenta tratada. Isso se deve segundo os autores ao fato de que, com o arredondamento do gume gerado pelo tratamento, há um aumento do raio do gume e da área de contato entre o gume e a superfície, o que tende a ocasionar um rebaixamento das cristas geradas pela passagem da ferramenta. Ainda, os autores verificaram que as ferramentas que receberam o

tratamento propiciaram uma melhora significativa em termos de desgaste, aumentando a vida das ferramentas em aproximadamente 50%, a análise das curvas de comportamento do desgaste apontou um processo mais estável com a utilização das ferramentas que tiveram seu gume tratado.

Um estudo para avaliar os diferentes métodos de preparação de gume, foi realizado por BOUZAKIS (2014), o autor analisou a influência de diferentes métodos de preparação de gume no fresamento a seco de materiais como 42CrMo4, aço inoxidável 304L, as ligas Inconel 718 e Ti6Al4V. Os acabamentos testados neste estudo foram acabamento por arraste, jateamento de partículas abrasivas, polimento com cerdas abrasivas, polimento magnético, acabamento por laser, fluxo abrasivo e fluxo abrasivo controlado. Os autores notaram que o tratamento tem impactos variados, não uniformes, o mesmo tratamento teve comportamentos distintos entre os materiais usinados, alguns casos aumentando, outros diminuindo o desempenho da ferramenta. Veja na Tabela 1 um resumo do desempenho da vida útil da ferramenta, nos diferentes tipos de tratamento de gume e nos diferentes materiais.

Tabela 1 – Comparação entre tratamentos de gume e tipos de materiais

|                               | 42CrMo4<br>QT  | AISI 304L  | Inconel<br>718   | Ti6Al4V  |
|-------------------------------|--|--|--|--|
| Jateamento Abrasivo           |  93%  |  95%  |  102% |  162% |
| Fluxo abrasivo controlado     |  89%  |  103% |  137% |  192% |
| Polimento magnético           |  113% |  95%  |  126% |  108% |
| Fluxo abrasivo                |  92%  |  103% |  132% |  155% |
| Arraste                       |  94%  |  108% |  134% |  141% |
| Polimento c/ cerdas abrasivas |  126% |  69%  |  130% |  92%  |
| Acabamento por laser          |  63%  |  65%  |  147% |  121% |

 < 80%      80% <  < 120%      120% > 

Fonte: Adaptado de BOUZAKIS et al., (2014)

Em estudo recente KREBS (2018) consiste na preparação de gume de micro fresas, usando o processo de jateamento abrasivo. Os autores ressaltam que está técnica é muito adequada para este propósito, uma vez que concluíram uma melhoria significativa no que diz respeito à condição de gume de corte, removendo

todos os defeitos recorrentes dos processos de fabricação, ressaltam que mais estudos devem ser feitos para mesurar o quanto implica esta geometria favorável para a vida útil da ferramenta.

Outro estudo recente por FONTANIVE; ZEILMANN; SCHENKEL, (2019) compreende a avaliação de tratamento de gume de fresas de topo em metal duro, o material usinado foi o Inconel 718 (liga de níquel), o estudo mostra que ferramentas sem tratamento tendem a aumentar a rugosidade do material usinado, principalmente na operação a seco. A técnica utilizada foi polimento com escova de filamentos de nylon com grão abrasivo.

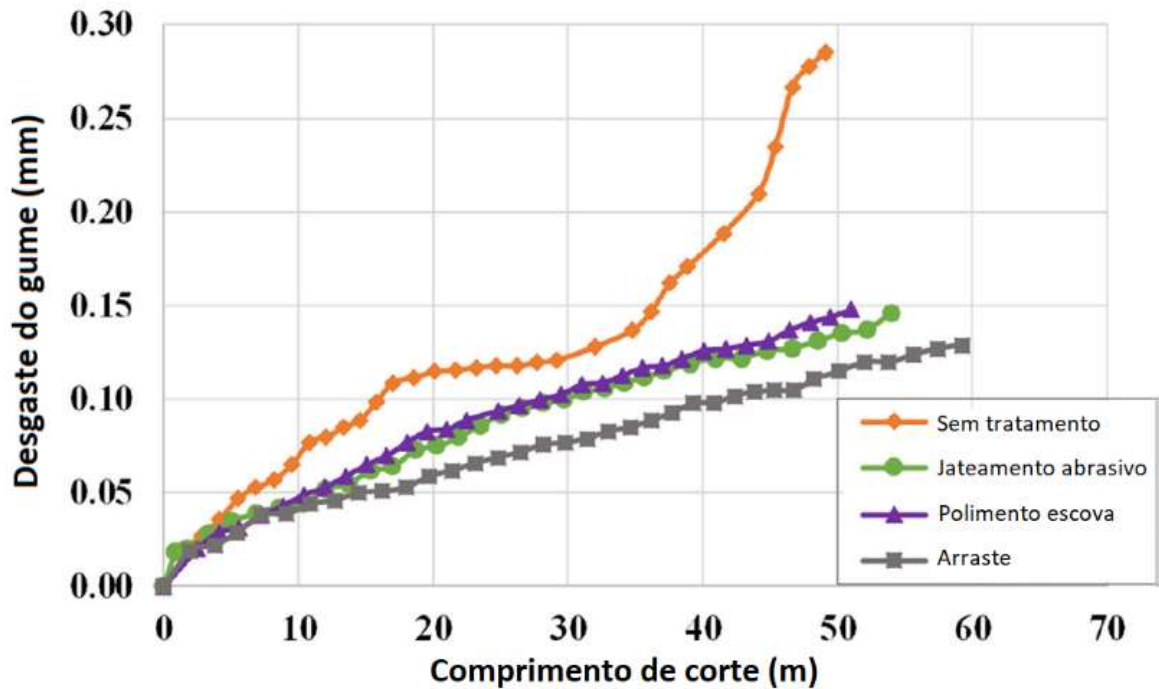
As comparações entre preparações de gume e sua influência na rugosidade, forças de corte e vida útil da ferramenta são de suma importância para entendermos as variáveis deste processo. Em estudo realizado por WANG (2020) investigou a influência de três diferentes técnicas de tratamento de gume, por jateamento abrasivo, polimento com escovas de nylon impregnadas com diamante sintético(abrasivo) e por arraste. O aço usinado para realização dos testes foi AISI 4140, usando insertos de metal duro sem revestimento, os resultados são listados a seguir:

- a) Entre os tratamentos de gume o melhor desempenho nos testes foi o tratamento por arraste, melhor qualidade superficial do gume, forças de corte mais baixas, maior vida útil da ferramenta e menor rugosidade da peça usinada.
- b) Todos os tratamentos melhoraram a tensão residual compressiva e a dureza do gume, comparando com ferramentas sem tratamento.
- c) A rugosidade do gume no tratamento por jateamento abrasivo é maior comparado com os outros tratamentos.
- d) O desgaste da ferramenta foi gradual nas ferramentas tratadas, as ferramentas não tratadas sofrem um desgaste mais catastrófico, não linear.
- e) O comportamento termomecânico previsto por elemento finito mostra um aumento na temperatura máxima de operação e tensões nas ferramentas tratadas. No entanto, a taxa de variação é menor em gumes tratados do que gumes não tratados.

Para uma ferramenta de usinagem confiável uma das principais premissas buscadas é a sua linearidade no desempenho durante a vida útil, ou seja, que durante a usinagem o corte se mantenha o mais linear do

começo ao fim da vida útil da ferramenta. Esta característica pode ser vista no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Gráfico comparando vida útil da ferramenta nos diferentes tratamentos



Fonte: Adaptado de WANG et al., (2020).

Este gráfico mostra que quanto mais linear a curva, menor é o desgaste da ferramenta, uma ferramenta sem tratamento possui um comportamento não linear, este comportamento reflete na aceleração dos desgastes. As técnicas de tratamento proporcionam um comportamento linear no desgaste da ferramenta, a consequência disto é uma maior vida útil da ferramenta.

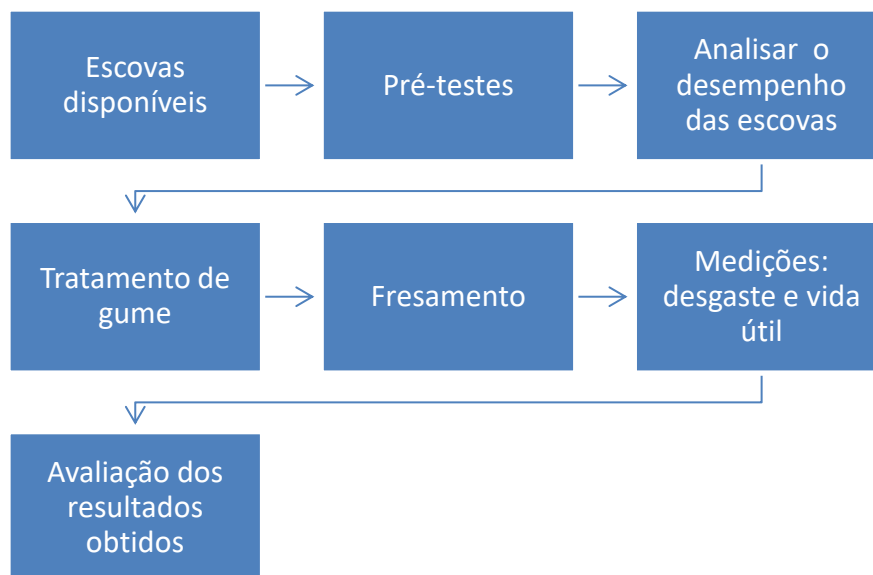
O estudo das técnicas de tratamento de gume e suas influências na vida útil e desempenho vem se intensificando nas duas últimas décadas, estes estudos buscam entender como prolongar a vida útil das ferramentas de usinagem com o máximo de eficiência.

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo aborda às metodologias que foram utilizadas para a realização dos testes experimentais. Neste capítulo também foram descritos os parâmetros para testes, bem como ferramentas, equipamentos e materiais utilizados durante a pesquisa. Por consequência, foram descritos e detalhados os procedimentos para a avaliação dos resultados obtidos, segundo normas e parâmetros estabelecidos, com a finalidade de gerar dados e conclusões, para avaliação no próximo capítulo.

Na Figura 10 o esquema representativo mostra as etapas dos testes experimentais que serão descritos neste capítulo do trabalho.

Figura 10 – Esquema representativo das etapas dos testes experimentais



Fonte: O autor (2021).

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com a finalidade de realizar os testes experimentais, foram traçados planos com o objetivo de propor variações no gume de ferramentas de usinagem, o tratamento utilizado é por polimento com escovas de cerdas abrasivas. As ferramentas tratadas são comparadas com ferramentas sem tratamento, ambas seguiram o mesmo roteiro de testes e parâmetros preestabelecidos. Para a escolha



da escova usada no tratamento 4 tipos diferentes de escovas foram avaliadas, que foram abordadas na fase de pré-testes.

### **3.1.1 Definições iniciais**

Para que os resultados sejam confiáveis e mesuráveis, os parâmetros de corte e de processos precisam ser controlados, no processo de usinagem o número de variáveis que tem influência é considerável, por isso dá importância de manter a maior quantidade de variáveis sob controle. Sendo assim, para que os testes realizados sejam confiáveis, e para que apenas o tratamento de gume atue efetivamente nos resultados obtidos para vida útil da ferramenta, alguns parâmetros foram fixados. Assim, a velocidade de corte ( $v_c$ ) e o avanço ( $f_z$ ) utilizados foram de 180 m/min e 0,06 mm/gume, respectivamente.

Os ensaios de fresamento foram realizados com passes de 252 mm de comprimento, com profundidade axial ( $a_p$ ) e profundidade lateral ( $a_e$ ) fixos, respectivamente de 0,5 mm e de 0,2 mm. A estratégia de usinagem utilizada em todo ensaio é concordante.

Segundo dissertação escrita por Ost (2016) inúmeras condições de usinagem foram aplicadas nos testes, como a aplicação de fluido lubrificante, para avaliar a influência do fluido nos resultados. Entretanto, no presente trabalho a fresagem ocorreu a seco, sem a presença de fluido lubrificante. Essa condição foi estabelecida para que os resultados obtidos no estudo de desgaste não fossem alterados pela introdução de fluidos, fazendo que apenas o tratamento de gume tenha interferência nos resultados obtidos.

### **3.1.2 Variáveis de Entrada**

Para que os objetivos propostos neste estudo sejam atendidos, foram variadas as granulometrias das escovas utilizadas no tratamento de gume por polimento. Para identificar qual grão seria abordado no estudo foram realizados pré-testes que foram abordados no tópico 3.3, a fim de identificar qual dentre as opções do mercado é a mais adequada para o tratamento, sendo encontrado inúmeras variações de formas e granulometrias.

As fresas passarem pelo tratamento de gume usando a escova selecionada, e após, aplicada ao processo de fresamento de topo reto, por fim, comparadas com ferramentas sem o tratamento.

### **3.1.3 Variáveis de Saída**

No trabalho foi avaliada como variável de saída o desgaste da ferramenta no processo de fresamento, esta variável traz como resultado a vida útil da ferramenta. Para tal avaliação, foram seguidas as determinações que levam o desgaste da ferramenta tratada no processo de fresamento.

Com relação ao desgaste, o parâmetro que foi utilizado para o fim de vida da ferramenta foi o desgaste de flanco máximo ( $VB_{max}$ ) de 0,2 mm ou lascamento da ferramenta.

### **3.1.4 Material para corpo de prova**

Como corpo de prova foi utilizado o aço AISI P20, material usado para cavidades de matrizes de injeção, devido sua capacidade de obter-se superfícies espelhadas e boa usinabilidade, características ideais para uma cavidade de uma matriz.

O corpo de prova teve suas faces retificadas, para garantir melhor fixação, diminuir a vibração e garantir uma entrada da ferramenta uniforme. As dimensões são 252 mm x 80 mm x 60 mm com dureza média de 38 HRc.

O ensaio tem seu início com a ferramenta nova, com paradas a cada 5 metros lineares, para captação de imagens e medições até o fim da vida útil da ferramenta. Na Figura 11 a montagem proposta é ilustrada.

Figura 11 – Montagem dos corpos de prova



Fonte: Adaptado de Buckell (2019).

### 3.1.5 Ferramentas

Para a realização do trabalho as ferramentas escolhidas foram fresas de metal duro classe K40. O diâmetro de corte e da haste são 6 mm, o comprimento total ( $l_2$ ) de 80,5 mm, sendo que o comprimento de corte ( $l_1$ ) é de 30 mm. A fixação foi realizada através de um mandril de fresamento hidráulico de alta potência da marca Seco Tools, modelo BT40ADB-PMC20-065, utilizando luva de redução 20 para 6 mm. A montagem ocorreu para uma razão de comprimento por diâmetro ( $l/d$ ) igual a 3.

Para que o tratamento de gume tenha maior influência e representatividade nos resultados dos testes, estas ferramentas segundo o fabricante não possuem raios de quina assim como não possuem revestimento.

As ferramentas possuem 4 gumes de corte, com ângulo de hélice de  $30^\circ$ . O ângulo de cunha ( $\beta$ ) é  $72^\circ$ , ângulo de folga ou incidência ( $\alpha$ ) de  $10^\circ$  e ângulo de saída ( $\gamma$ ) de  $8^\circ$ . Na Figura 12 especificações da ferramenta e montagem no mandril são ilustradas.

Figura 12 – Especificações da ferramenta



Fonte: Adaptado de Buckell (2019).

### 3.1.6 Equipamentos

Os testes propostos foram realizados nas dependências da UCS, no Laboratório de Usinagem, localizado no bloco D. Para realização da usinagem o equipamento usado foi um centro de usinagem da marca Hartford (modelo LG-500). Possui uma potência máxima de 10 kW e rotação máxima de 10.000 rpm.

Para medição de rugosidade utilizou-se o rugosímetro portátil da Mitutoyo, modelo SJ-301. Segundo o fabricante a capacidade de resolução é de  $0,01 \mu\text{m}$ , possui um raio de ponta do apalpador de diamante de  $5 \mu\text{m}$  e coincidência de  $90^\circ$ .

## 3.2 Polimento por escovas com cerdas abrasivas

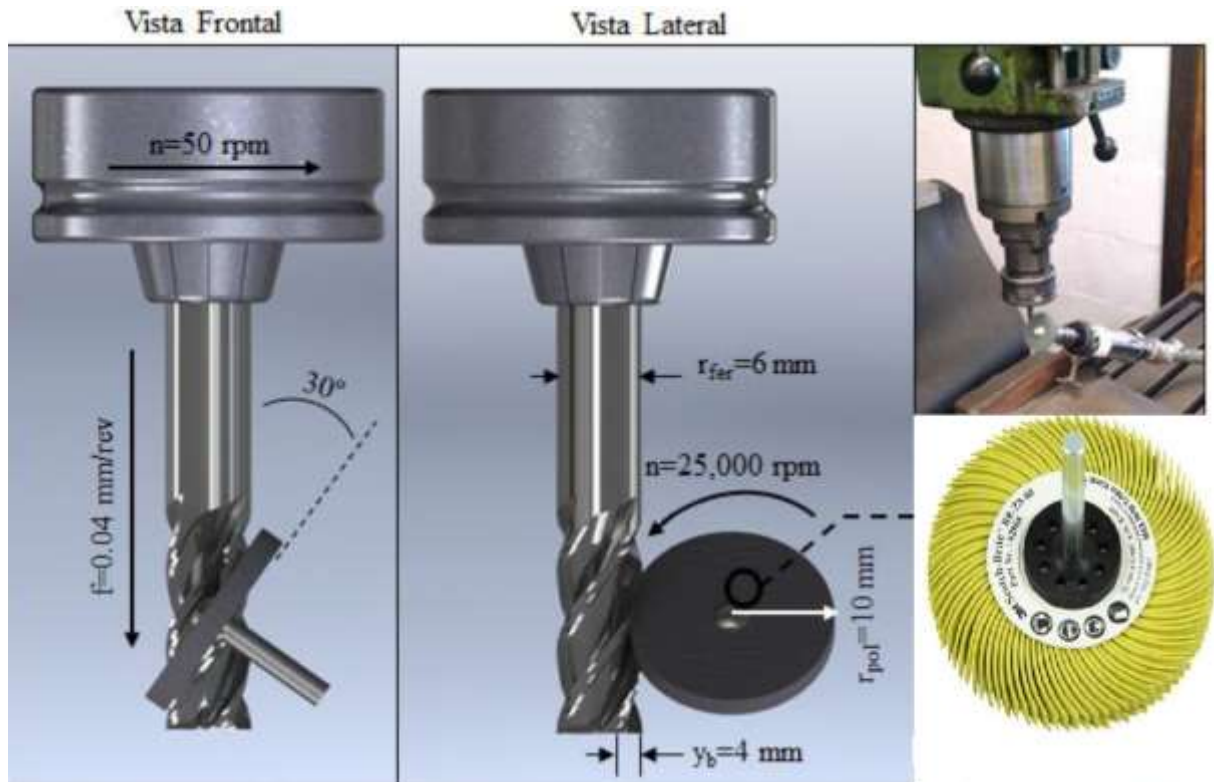
O procedimento de tratamento de gume foi realizado nas dependências da UCS, as escovas foram fixadas em uma haste de metal que proporcionou garantias que as escovas girassem com excentricidade no eixo. Para que a escova gire usa-se uma mini retifica manual e pneumática da marca Campbell Hausfeld, com velocidade

de 10.000 rpm, operando com pressão de 4 bar. A retífica precisa ser presa, para tal usa-se uma mesa do próprio centro de usinagem.

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, no eixo z, percorrendo cada gume um total de 32 vezes. A posição da escova seguiu a mesma do ângulo da hélice da ferramenta, que é de 30°. A profundidade de contato foi ajustada para aproximadamente 2 mm. O tempo de polimento foi de aproximadamente 1 minuto por gume.

Este procedimento de tratamento é semelhante ao utilizado por Ost (2016), porem o autor referido usou esponja abrasiva, a Figura 13 ilustra o processo de polimento.

Figura 13 – Processo de polimento



Fonte: Adaptado de Ost (2016).

### 3.3 PRÉ-TESTES

Para determinar qual a escova selecionada entre as opções disponíveis, foi necessária uma fase de avaliação e comparação das escovas, esta fase busca entender as diferenças entre as escovas de cerdas abrasivas.

Nesta etapa escovas verticais serão observadas, principalmente no quesito acabamento, pois o objetivo central é mínima remoção de material e melhora no tratamento superficial da ferramenta. Devido aos equipamentos dispostos no laboratório não foi possível o uso das escovas verticais, estas escovas necessitam de uma retífica angular e de dispositivos específicos para sua fixação. Para análise do desempenho das escovas no tratamento de gume, necessitou de uma fresa reafiada, para no final desta etapa comparar os desempenhos de cada escova, a ferramenta utilizada nesta etapa não passou para a etapa de fresamento e medição de vida útil.

As escovas em análise serão da marca 3M, da linha Bristle, com cerdas de nylon finas e grossas, grãos abrasivos 80, 120 e 1 micrón. Nesta etapa decide-se se a opção será por escovas verticais com cerdas finas ou grossas, assim como sua granulometria. Na Figura 14 observa-se algumas das opções de escovas que o fabricante dispõe em seu portfólio.

Figura 14 – Escovas com cerdas abrasivas 3M (Bristle)



Fonte: Adaptado de 3M Abrasivos (2003).

Na Figura 14 as escovas B, D, F, J e L representam aplicações que o fabricante sugere, como remoção de tintas, ferrugem e rebarbas, assim como polimento superficial ilustrada na escova G, estas escovas citadas possuem um diâmetro de 152 mm. As escovas ilustradas na imagem I faz parte da família de escovas utilizadas neste trabalho, com diâmetro de 76 mm.

Nas escovas radiais o fabricante separa por dois grupos principais, cerdas finas e cerdas grossas, menor diâmetro de cerda e maior respectivamente. As escovas verticais possuem apenas um diâmetro de cerda (grossa), se caracterizam por uma agressividade maior, neste modelo o grão mais fino é o 120.

Estes testes são importantes pois as escovas não podem danificar os gumes da ferramenta, a remoção deve ser mínima, como referido no presente trabalho esta técnica pode-se referir como um tipo de polimento.

Medições de rugosidade no gume foram medidas e comparas entre as escovas e o estado original da ferramenta. Para o parâmetro da avaliação de rugosidade, foi utilizado o critério de Ra, mensurado em 5 pontos do gume.

Para analisar o arredondamento do gume, fez-se uso do equipamento Formtracer Avant S-3000 CR da Mitutoyo, equipamento analisa o contorno do gume, como resposta temos o raio do gume, a velocidade de apalpamento utilizada foi de 0,05 mm/s e o ponto medido foi 5 mm da quina da ferramenta. Este equipamento se encontra na Castertech.

### 3.4 TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais começam na fase de pré-testes no tópico 3.3, após a conclusão destes testes a escolha da escova usada no tratamento de gume já é de conhecimento.

Esta escova foi usada para o tratamento de gume das ferramentas necessárias, em seguida as ferramentas passaram pelo processo de fresamento do aço P20. Para coletar os dados e comparar os resultados obtidos, foram realizados os acompanhamentos e medições de desgaste para a medição da vida útil da ferramenta.

A usinagem acontece com paradas de 5 metros lineares, para captação de imagens e medições do desgaste da ferramenta, até o fim da vida útil da ferramenta,

que ocorre quando o desgaste de flanco máximo ( $VB_{max}$ ) é de 0,2 mm ou o lascamento da ferramenta.

Todos esses passos e parâmetros foram necessários para um diagnóstico final, sendo possível identificar se os objetivos traçados neste estudo foram alcançados.



## 4 RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados provenientes desde a seleção da escova até os testes experimentais de fresamento. Para início do estudo realizou-se a escolha da escova através da etapa pré-testes, em seguida a análise da escova, na sequência, o tratamento de gume nas ferramentas selecionadas. Por fim, as ferramentas tratadas passam pelo processo de fresamento, onde as ferramentas são analisadas pelos resultados provenientes do efeito do tratamento de gume, sobre a qualidade superficial da ferramenta através da medição da vida útil da ferramenta, tendo como parâmetro os desgastes e seus mecanismos de avaliação.

### 4.1 PRÉ-TESTES

Os pré-testes foram realizados com o propósito de identificar, dentre as opções que o fabricante dispõe no seu portfólio combinado com as escovas que foram dispostas para teste, qual dentre elas tem melhor desempenho para a aplicação de tratamento de gume. Esta fase se torna de alta relevância, pois a escova selecionada nesta etapa será a utilizada na fase de tratamento de gume, as ferramentas tratadas seguiram para a fase de fresamento, ou seja, a escolha da escova tem interferência direta nos resultados obtidos neste trabalho.

Para a escova ser aprovada nesta etapa de pré-testes ela precisa preencher duas premissas básicas, se moldar a geometria da ferramenta e melhorar o acabamento, arredondando o gume, proporcionando um raio no gume. Os testes seguem os parâmetros estabelecidos no item 3.2 deste trabalho.

#### 4.1.1 Escovas abrasivas

Foram selecionados quatro tipos distintos de escovas radiais, sendo duas escovas com cerdas grossas e duas escovas de cerdas finas, com respectivos diâmetros ou espessura de cerda 1 mm e 5 mm. Para o teste selecionou-se uma fresa reafiada (A5) a ferramenta possui 4 gumes, referência do fabricante: Seco Tools, de código 91060 da linha Jabro. Sendo utilizado uma escova por gume, a

ferramenta não possui nenhum tratamento ou revestimento posterior a reafiação. Na Tabela 2 encontra-se a descrição das escovas e gumes selecionados.

Tabela 2 – Descrição das escovas por gume selecionado

| <b>Escova</b>        | <b>Grão</b> | <b>Gume</b> | <b>Componente abrasivo</b> |
|----------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| Amarela cerda grossa | 80          | 1           | Óxido de alumínio          |
| Amarela cerda fina   | 80          | 2           | Óxido de alumínio          |
| Branca cerda grossa  | 120         | 3           | Óxido de alumínio          |
| Verde cerda fina     | 1 micron    | 4           | Carbeto de silício         |

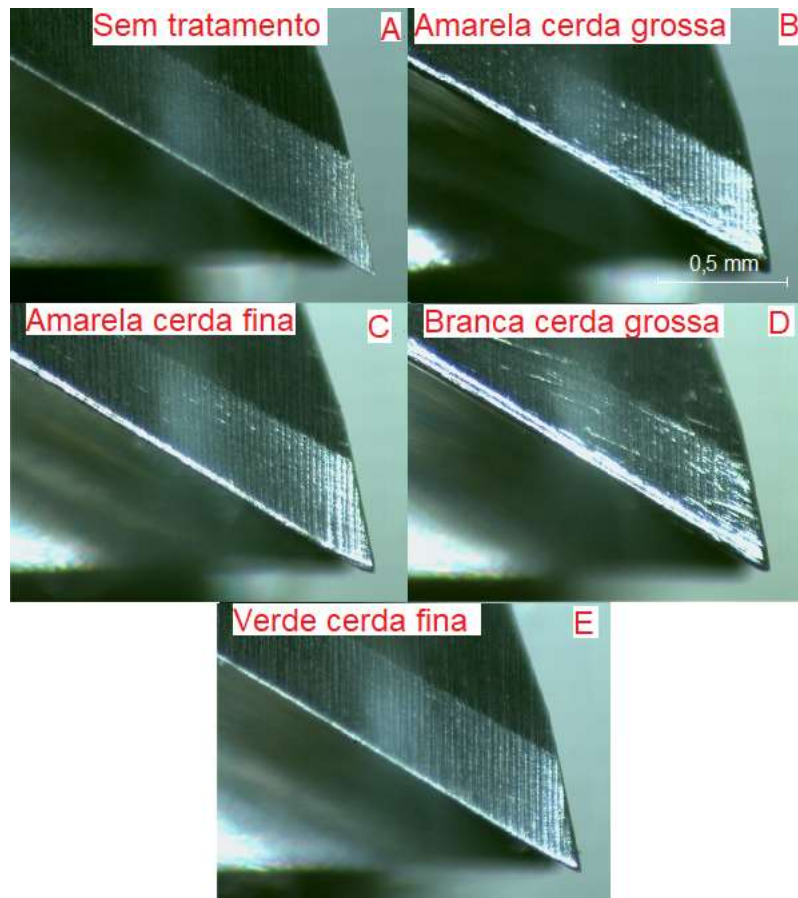
Fonte: O autor (2021).

Como parâmetro utilizou-se os mesmos do tratamento de gume, tempo de operação, rotação e ângulos. Reproduziu-se o tratamento de gume, porém cada gume da ferramenta com uma escova diferente, enumeradas de acordo com a tabela acima.

#### **4.1.2 Avaliação do tratamento por imagens**

Na Figura 15 observa-se imagens do flanco da ferramenta, geradas pelo estereoscópio trinocular de medição universal, imagens com 45 vezes de ampliação. É importante o entendimento do acabamento que o tratamento está impondo na ferramenta, assim como comparar com a ferramenta original e os tratamentos propostos.

Figura 15 – Análise do flanco dos gumes antes e depois do tratamento



Fonte: O autor (2021).

Nota-se diferenças visuais no acabamento do flanco, em todos os tratamentos, com destaque maior para 15-B e 15-D. A ferramenta no seu estado inicial possui um acabamento homogêneo no sentido horizontal, acabamento proporcionado pela retifica, responsável pela fabricação e reafiação da ferramenta, este acabamento pode ser visto em 15-A. O maior brilho nas imagens é devido a ação do grão abrasivo impregnado nas escovas, é visível o acabamento na direção contrária do acabamento da retifica, no sentido vertical da ferramenta. Nota-se também na imagem 15-B e 15-D que a agressividade é muito superior, devido a maior rigidez das cerdas grossas, essa agressividade pode ser demasiada no gume, produzindo raios que afetem negativamente o desempenho da ferramenta.

Na Figura 16 a comparação é com a face da ferramenta, nestas imagens os gumes 1, 3 e 4 foram os que mais sofreram alterações no acabamento. As escovas com cerdas grossas com grão de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), ilustradas nas posições

de gume 1 e 3 da imagem, possuem uma maior agressividade quando comparado com as escovas de cerdas finas, posições de gume 2 e 4 da imagem. Porém nota-se que a escova do gume 4 mesmo possuindo um grão menor comparando com as demais escovas, possui uma agressividade considerável, isto está relacionado ao tipo de grão abrasivo, que no caso desta escova é o carbeto de silício (SiC).

Segundo (DE PELLEGRIN; STACHOWIAK, 2001) as partículas de SiC mesmo em tamanhos menores possuem uma alta área de penetração. Partículas de SiC são amplamente usadas em abrasivos para acabamento, devido sua facilidade de se quebrar e auto afiar no processo prático. De acordo com o fabricante das escovas, a 3M utiliza o SiC com dureza de 9,15 MOHS e o  $Al_2O_3$  com 9,06 MOHS.

Figura 16 – Análise da face dos gumes antes e depois do tratamento



Fonte: O autor (2021).

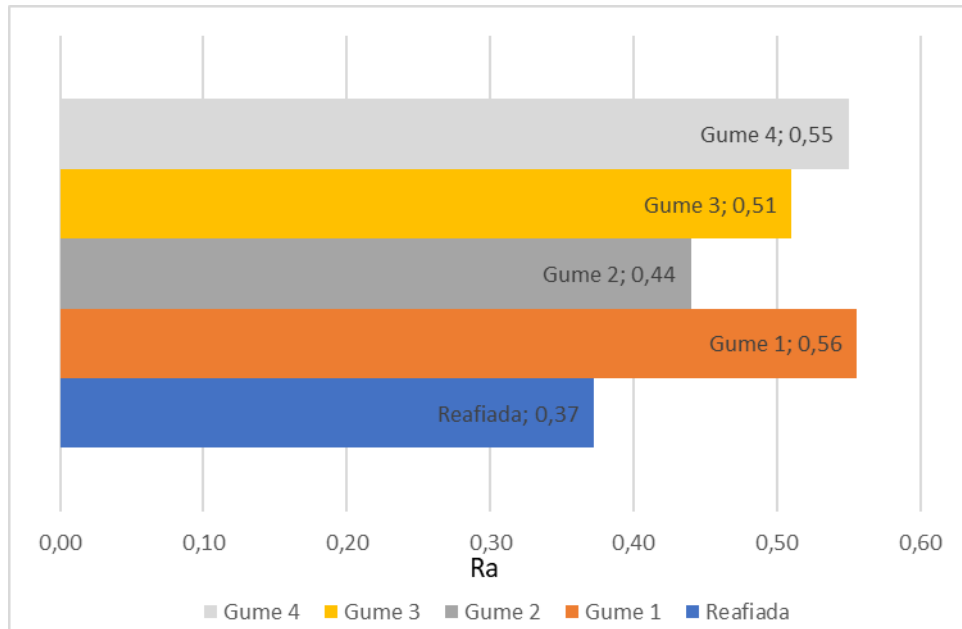
#### 4.1.3 Rugosidade

A agressividade dos abrasivos SiC e  $Al_2O_3$  que compõem as escovas, também foram diagnosticadas com a medição da rugosidade no flanco do gume principal, os equipamentos usados para medição da rugosidade estão referidos no item 3.1.6 deste trabalho. Os valores das rugosidades mostrados no Gráfico 2, foram obtidos a partir do cálculo da média de 5 medições de rugosidade por gume da ferramenta.

Nota-se que uma ferramenta reafiada sem tratamento possui uma rugosidade média de 0,37 Ra, quando a ferramenta é submetida ao tratamento com as escovas

sua rugosidade é alterada, atestando que o grão abrasivo agiu na superfície da ferramenta.

Gráfico 2 – Gráfico de comparação de Ra



Fonte: O autor (2021).

O material utilizado para confecção das ferramentas é uma liga com alta dureza e resistência ao desgaste, mesmo com estas propriedades as escovas se mostraram eficazes para agir e modificar a superfície das ferramentas.

#### 4.1.4 Avaliação das cerdas

Nesta avaliação estão alguns pontos qualitativos das escovas, avaliados nesta fase de pré-testes. Dois pontos negativos encontrados na escova amarela com cerda fina grão 80 foram: a grande quantidade de rebarbas e os aglomerados de grãos, possivelmente decorrentes do processo de fabricação das escovas, a injeção de termoplástico. O processo de injeção das escovas basicamente compreende a plastificação do nylon sendo que: 20% do aquecimento é gerado pelas resistências da injetora e 80% pelo atrito gerado entre rosca e o canhão (MANRICH, 2013). O grão abrasivo é adicionado após o nylon estar com viscosidade alta e homogêneo, sendo misturado a massa polimérica uma quantidade de grãos em uma certa faixa de tempo, com a finalidade de manter uma dispersão e uma quantidade de grãos o

mais próximo do linear possível, esta massa polimérica é injetada em uma matriz com a cavidade da escova desejada. Estas rebarbas podem retardar o contato do grão abrasivo com a ferramenta, estas rebarbas foram encontradas em menor quantidade na escova verde de cerda fina, podendo estar relacionado ao tamanho de grão, não foi possível avaliar a dispersão de grãos com as técnicas utilizadas. Na Figura 17 é ilustrado as rebarbas encontradas na escova amarela com cerda fina assim como os aglomerados de grãos, em comparação ao lado encontra-se uma escova branca com cerda grossa.

Outro ponto a ser considerado é a maleabilidade, que neste processo se tornou relevante, as escovas com cerdas finas acompanham melhor a geometria da ferramenta. As escovas com cerdas grossas possuem uma melhor estrutura, cerdas mais firmes, em rotação mantem a estrutura da cerda com maior rigidez, diminuindo a maleabilidade, em consequência aumentando a abrasividade que neste processo se tornou irrelevante e prejudicial a ferramenta.

Figura 17 – Análise das cerdas das escovas



Fonte: O autor (2021).

Como observado na Figura 17 as escovas com cerdas finas possuem um volume maior de rebarbas comparado a escovas com cerdas grossas, as rebarbas podem estar ligadas a espessura da cerda, quanto maior a espessura menos rebarbas, assim como quanto maior o grão abrasivo maior o volume de rebarbas. Este defeito também pode estar ligado ao molde de injeção, podendo possuir folga entre as cavidades, ou relacionado ao processo de injeção, como o recalque.

#### 4.1.5 Contorno do gume

Para avaliar o arredondamento do gume analisa-se o raio do gume, para esta análise os equipamentos estão descritos no item 3.3 deste trabalho. A nível de comparação analisou-se uma fresa reafiada sem tratamento e a ferramenta que foi tratada com as 4 escovas, uma para cada gume.

A fresa reafiada sem tratamento possui um gume afiado e com irregularidades, devido a estes pontos o software do equipamento não identificou o perfil gerado como um raio, nestes casos só foi gerado o perfil do gume.

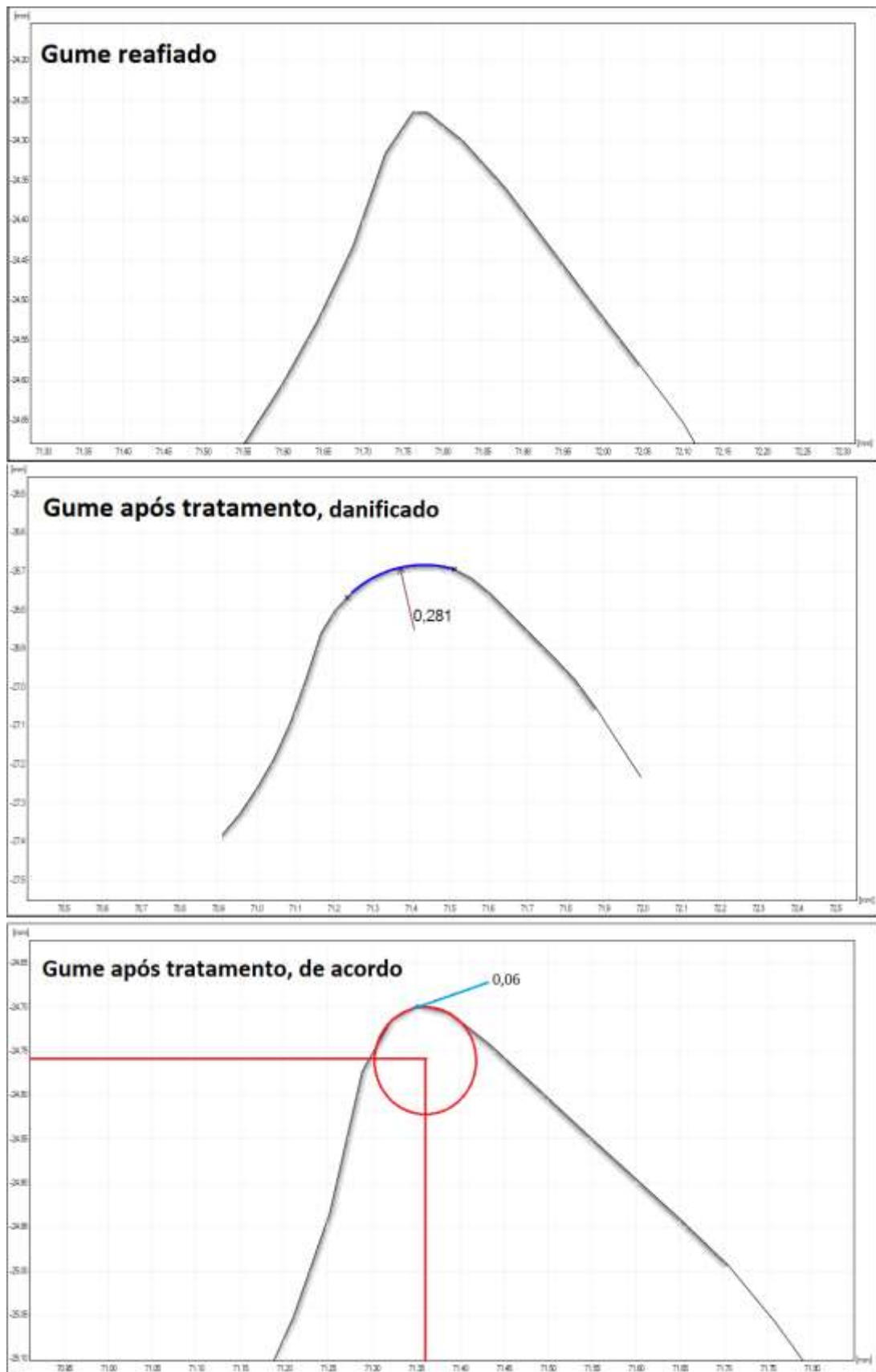
As análises da fresa tratada obteve como resultados no gume 1, 2 e 3 um arredondamento do gume capturado pelo software do equipamento, raios entre 0,250 e 0,282 mm, este arredondamento segundo a literatura é demasiado, podendo assim danificar o gume da ferramenta.

O gume 4 modicou o contorno, mas devido as limitações do equipamento não foi informado o raio, sendo assim o equipamento apenas gerou o perfil, porém com um cálculo manual utilizando a equação reduzida da circunferência estima-se um raio na casa de 0,06 mm aproximadamente, este valor fica dentro de um arredondamento aceitável para um gume tratado. A Figura 18 contém a comparação de imagens do gume da ferramenta sem tratamento, tratada com o gume danificado e tratada com o gume de acordo com o objetivo do trabalho.

As escovas com cerdas grossas e a escova de cerda fina grão 80 nesta avaliação tiveram seu desempenho falho, a remoção de material foi superior ao esperado. Devido a esta alta remoção de material o gume ganhou raios entre 0,250 e 0,282 mm, esta alta remoção provavelmente está ligado ao tamanho do grão abrasivo, estas escovas possuem grãos de  $Al_2O_3$  na granulometria 80 e 120.

A escova verde de cerdas finas teve um desempenho dentro do proposto no trabalho, conseguiu remover material suficiente para gerar um raio de 0,06 mm. Esta escova possui um grão de SiC com granulometria de 1 micrón, mesmo com uma granulometria tão pequena a escova conseguiu gerar o raio proposto, a abrasividade e as características do SiC fazem com que mesmo em granulometrias na faixa de micrón a remoção de material esteja presente no processo.

Figura 18 – Comparação entre gumes



Fonte: O autor (2021).



Esta técnica permitiu uma análise do raio gerado pelo tratamento, os dados coletados permitiram averiguar que apenas a escova verde com cerdas finas obteve um raio dentro do proposto. As demais escovas arredondaram demasiadamente o gume, com raios na faixa de 0,250 e 0,282 mm, este procedimento pode afetar no desempenho e vida útil da ferramenta.

#### 4.1.6 Conclusão dos pré-testes

Devido aos pontos destacados nesta fase de pré-testes e o desempenho das escovas no teste prático para o tratamento de gume, as escovas com cerdas grossas não se mostraram eficazes para a operação. As escovas com cerdas finas proporcionaram um melhor desempenho prático, estas conseguiram mostrar através das imagens coletadas e das análises de rugosidade e contorno uma melhor modificação da superfície desejável para a aplicação.

Entre as escovas com cerdas finas, a escova verde com grão de SiC de 1 micron se mostrou eficaz nos pontos: acabamento de flanco, acabamento de face, rugosidade, avaliação das cerdas e contorno de gume nesta fase de pré-testes. Como principal ponto o contorno do gume realizado por esta escova, não danificando o gume e realizando um leve arredondamento.

Para um melhor entendimento a Quadro 1 mostra um resumo dos principais pontos para a decisão da escolha da escova selecionada.

Quadro 1 – Resumo dos pontos abordados nos pré-testes

|                      | Amarela cerda grossa grão 80 | Amarela cerda fina grão 80 | Branca cerda grossa grão 120 | Verde cerda fina 1 micron |
|----------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Acabamento Flanco    |                              |                            |                              |                           |
| Acabamento face      |                              |                            |                              |                           |
| Rugosidade           |                              |                            |                              |                           |
| Avaliação das cerdas |                              |                            |                              |                           |
| Contorno do gume     |                              |                            |                              |                           |

|        |            |
|--------|------------|
| Atende | Não atende |
|--------|------------|

Fonte: O autor (2021).

Para avançar para a fase de tratamento de gume a escova selecionada nesta fase de pré-testes foi a escova de nylon com cerdas finas com grão 1 microm de SiC. Duas ferramentas serão tratadas para comparação com a ferramenta não tratada, após serem submetidas pelo processo de fresamento.

#### 4.2 TRATAMENTO DE GUME COM A ESCOVA SELECIONADA

Nesta etapa duas ferramentas denominadas O6-28 e O6-29 reafiadas tiveram seus gumes tratados, com a escova de nylon com cerdas finas com grão de 1 microm de SiC. As ferramentas foram avaliadas anteriormente ao tratamento no estereoscópio trinocular de medição universal, para diagnosticar se as ferramentas possuíam trincas e/ou lascamentos. As duas ferramentas nas análises se mostraram aptas e sem avarias, consideradas aptas para o tratamento.

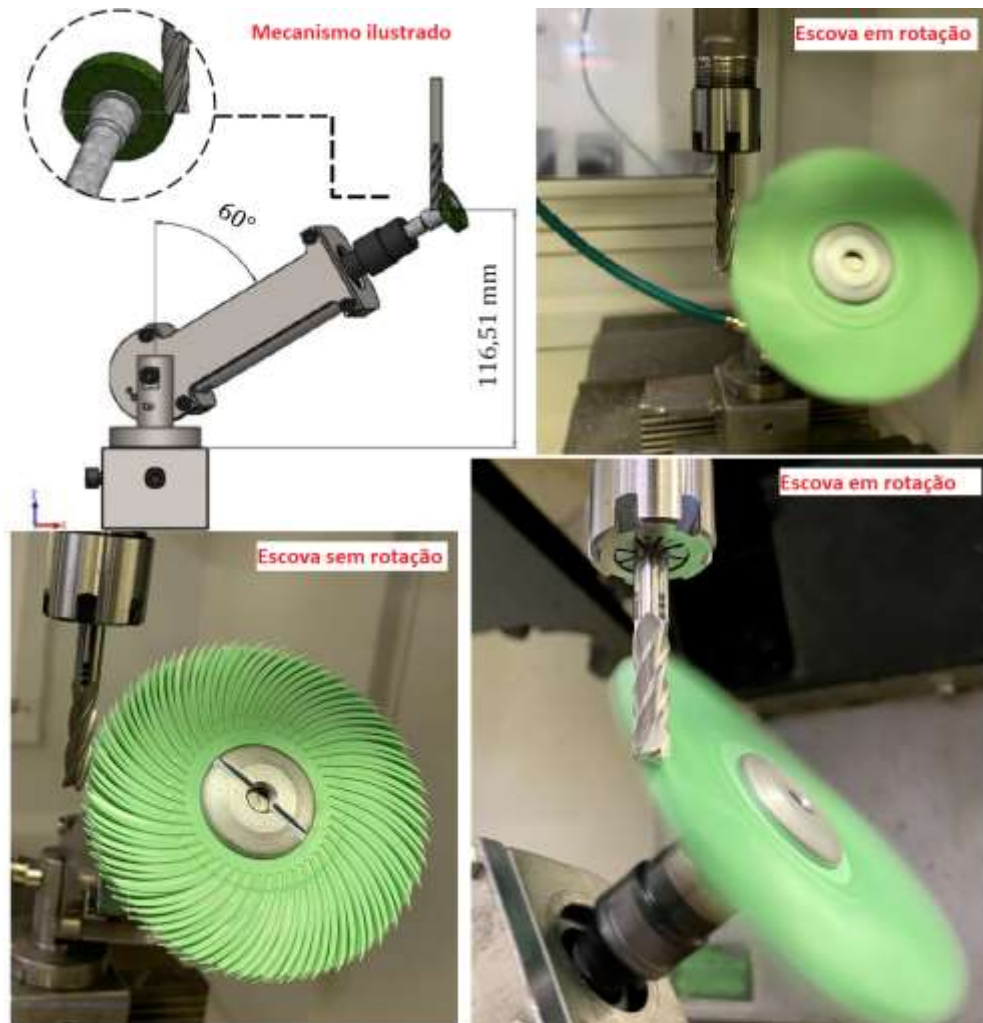
Para acompanhamento do perfil durante o tratamento da ferramenta foi utilizado uma programação no centro de usinagem, o qual simula um rosqueamento, este programa tem como objetivo fazer com que a fresa gire e se desloque mantendo o gume sempre em contato com a escova. Junto a isso é informado um avanço linear, relativo ao passo da rosca (F), neste caso, o passo da hélice de 32,65 mm.

A área linear da fresa atingida pelo tratamento é de 3,75 mm, medida do topo para a haste. A duração do tratamento é de aproximadamente 1 minuto por gume, são 32 passes nesta região durante este tempo. A Figura 19 ilustra o mecanismo, a escova sem e com rotação utilizada no processo.

Neste processo utilizou-se 4 escovas em linha, acopladas na haste da retifica reta, este procedimento auxilia na manutenção da geometria e direção da escova, tornando-a mais estável em rotação.

O processo de tratamento de gume transcorreu de acordo com o descrito no item 3.2 deste trabalho, a posição inicial de cada gume foi feita de maneira manual, com a finalidade do gume ficar completamente alinhado com a escova, este processo se repetiu a cada gume tratado.

Figura 19 – Mecanismo do tratamento de gume



Fonte: O autor (2021).

#### 4.2.1 Avaliação do tratamento

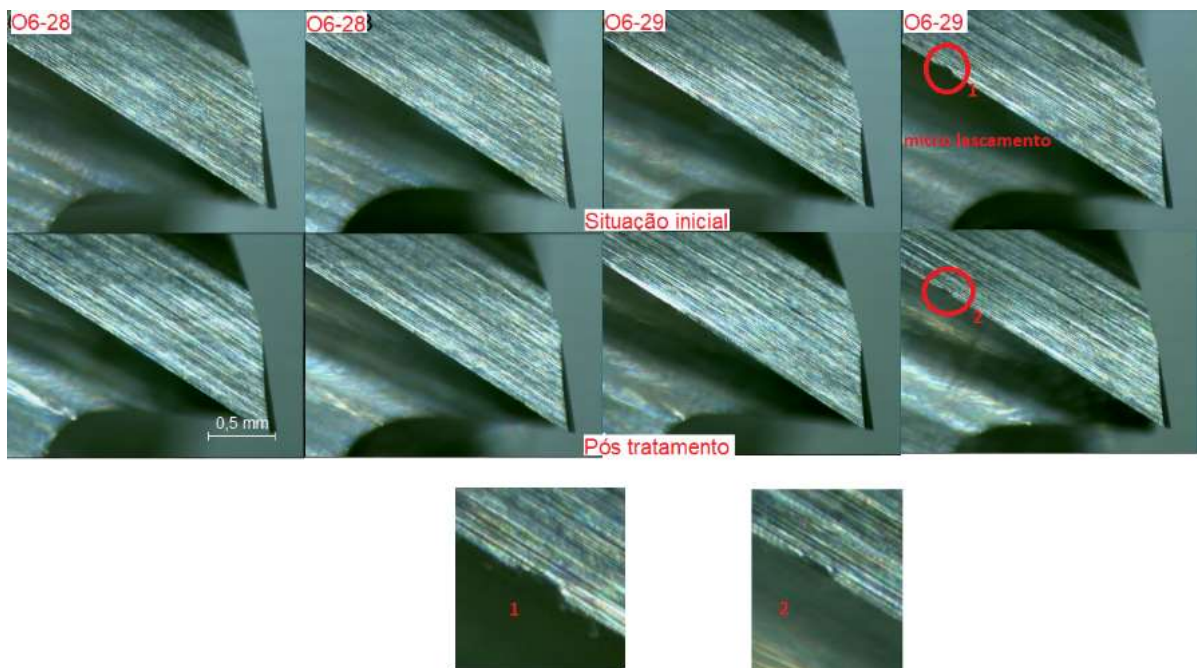
Após o tratamento de gume as duas fresas tratadas foram avaliadas novamente no estereoscópio trinocular de medição universal, com a ampliação de 30X, comparando com as imagens anteriores ao tratamento pode-se notar que o acabamento nas fresas foi alterado, atestando a ação do grão abrasivo na ferramenta.

O tratamento de gume tem como objetivo central o arredondamento do gume, o gume sem tratamento é um gume afiado suscetível a micro trincas, micro lascamentos e irregularidades. O arredondamento do gume acaba removendo ou amenizando estas imperfeições do gume, como prova prática na Figura 20 a

ferramenta O6-29 possuía um micro lascamento captado pelo estereoscópio, após o tratamento este micro lascamento diminuiu seu tamanho consideravelmente, amenizando assim um ponto suscetível a falha precoce da ferramenta.

Este defeito foi observado antes do tratamento, como o defeito estava em uma região que não comprometeria o resultado do fresamento, estava fora da área que a ferramenta entrou em contato com a peça, o mesmo foi usado para medir o quanto o tratamento seria efetivo na sua amenização.

Figura 20 – Comparação entre antes e após tratamento



Fonte: O autor (2021).

O defeito em análise em sua situação inicial possuía 0,14 mm de comprimento e 0,03 mm de profundidade, após o tratamento de gume o defeito reduziu seu tamanho para 0,07 mm de comprimento e 0,01 mm de profundidade.

O tratamento se mostrou eficaz no arredondamento do gume, eliminando ou amenizando irregularidades recorrentes do processo de afiação. O micro lascamento observado no equipamento com 30X de ampliação pode ser considerado um defeito de grande proporção, mesmo assim o tratamento amenizou consideravelmente o defeito.

A área do gume após o processo de fabricação ou reafiação é aguda, suscetível a imperfeições, o tratamento se mostrou eficiente para amenizar defeitos com grandes proporções, sendo assim defeitos no gume com menores proporções que não foram observados com a ampliação usada foram eliminados com o tratamento.

#### 4.3 TESTE DE USINAGEM

As ferramentas que foram tratadas foram submetidas ao teste de usinagem, parâmetros e equipamentos descritos nos itens 3.1.1, 3.1.4, 3.1.5, 3.1.6 deste trabalho. Os resultados foram comparados com ferramentas não tratadas, os dados destas ferramentas não tratadas foram extraídos do trabalho realizado por BUCKELL (2019), se trata da mesma classe, referência e fabricante das ferramentas.

O batimento das fresas tratadas foi avaliado e medido antes do fresamento, com valor de 0,05 em ambas as ferramentas.

##### 4.3.1 Vida útil das fresas na usinagem

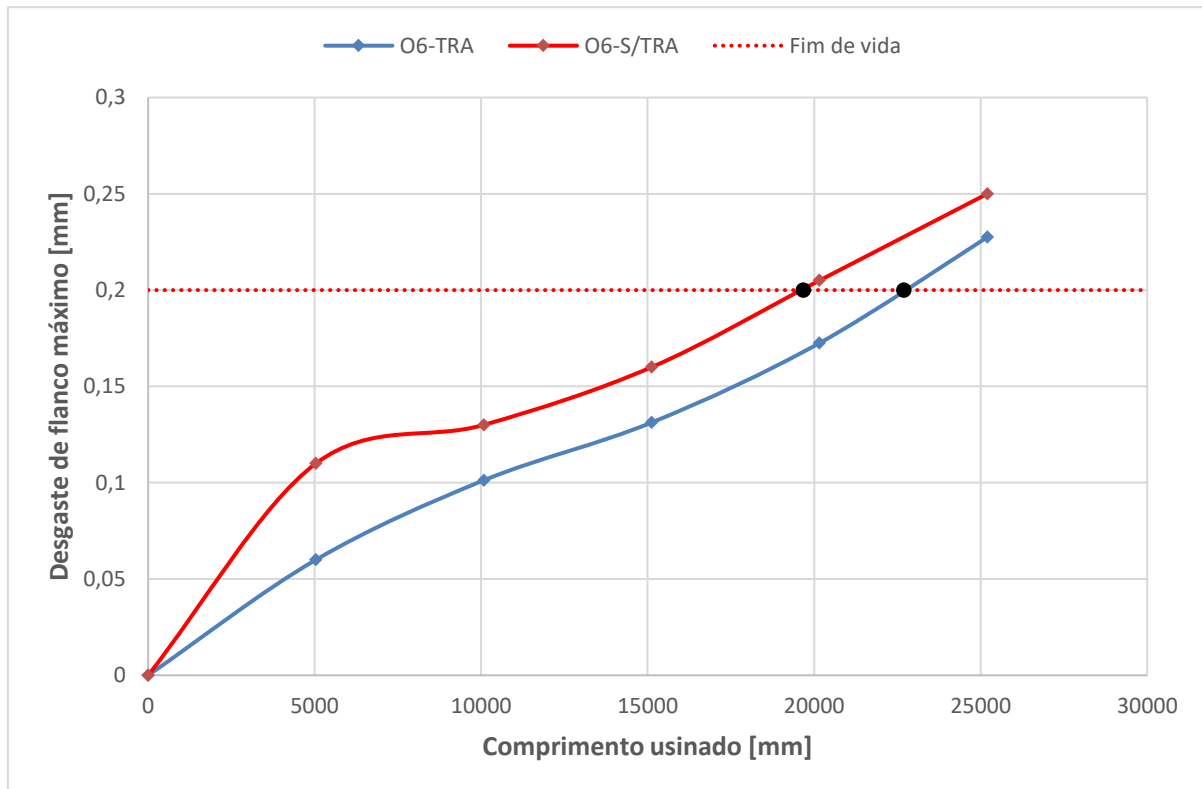
O acompanhamento da vida útil das fresas passa pelo acompanhamento da evolução do desgaste da ferramenta, esta medição de desgaste ocorreu a cada 5040 mm usinados. O desgaste avaliado e controlado foi o desgaste de flanco máximo ( $VB_{máx}$ ), marca que se propaga sobre a superfície do flanco, próximo a quina. A região da quina durante a usinagem é a região que sofre os maiores esforços mecânicos, esta região é o ponto que une o gume primário ao secundário. Com o objetivo de reforçar esta região estas ferramentas possuem um chanfro na região da quina.

O desgaste é medido individualmente, gume por gume, para gerar as curvas do comportamento foi considerado a média de desgaste dos gumes da fresa. A fresa possui quatro gumes, quando dois gumes da fresa ultrapassassem o  $VB_{máx}$  de 0,20 mm a usinagem foi finalizada, chegando assim ao final da vida útil da ferramenta.

No Gráfico 3 estão apresentadas as curvas de comportamento de desgastes. Em laranja estão representadas as curvas de comportamento do desgaste para duas fresas sem tratamento (O6-S/TRA) extraídos do trabalho realizado por BUCKELL (2019), representada pela média de desgastes ao longo do comprimento usinado.

Em azul, segue as mesmas premissas, mas para as fresas que foram tratadas com o polimento com escovas de cerdas abrasivas neste trabalho (O6-TRA).

Gráfico 3 – Curvas de desgaste



Fonte: O autor (2021).

Comparando as curvas de desgaste no Gráfico 3, as fresas tratadas tiveram um comportamento de desgaste linear desde o início da usinagem, pode-se assim dizer que o tratamento amenizou os desgastes do Estágio I, neste estágio a ferramenta sofre um desgaste acelerado, natural ao sistema tribológico envolvido segundo (MACHADO et al., 2015). As ferramentas ao chegarem ao  $VB_{\text{máx}}$  de 0,20 mm tiveram os seguintes resultados: para uma fresa sem tratamento o final de sua vida se deve a 19681 milímetros, já as fresas tratadas tiveram sua vida útil aumentada para 22692 milímetros, aumentando sua vida útil em 15,30 %.

Segundo (MACHADO et al., 2015) o desgaste pode ser dividido em três estágios: Estágio I, Estágio II e Estágio III. O Estágio I ocorre nos primeiros instantes de corte da ferramenta, onde ocorre um desgaste acelerado do seu gume, observando uma inflexão na curva de desgaste, este comportamento é visivelmente presente na ferramenta sem tratamento, as fresas com tratamento tiveram esta

curva amenizada, se compararmos aos 5040 mm de fresamento as fresas não tratadas estavam com um desgaste de flanco de 0,11 mm, em comparação as fresas com tratamento aos 5040 mm apresentaram apenas 0,06 mm de desgaste. Essa desaceleração no desgaste observada nas ferramentas tratadas, pode estar relacionada com o fato de o gume estar levemente arredondado, permitindo que os esforços da operação sejam mais bem distribuídos, amenizando o desgaste inicial.

Ainda segundo (MACHADO et al., 2015) o Estágio II compreende uma taxa de desgaste constante, aonde a ferramenta se encontra adequada ao processo, até atingir uma nova inflexão dando início ao Estágio III, neste estágio o desgaste é acelerado, provocando a quebra da ferramenta a qualquer momento. No presente trabalho as fresas tratadas não chegaram no Estágio III, as ferramentas tiveram sua avaliação mantendo-se no Estágio II até atingirem o desgaste de flanco  $VB_{\text{máx}}$  de 0,20 mm.

Nas demais paradas para a medição do desgaste, constatou-se uma evolução gradativa e linear do desgaste entre os gumes. O efeito do tratamento de gume é mais perceptível na primeira avaliação aos 5040 mm, neste ponto consideravelmente a ferramenta sofreu menos desgaste, porém o efeito do tratamento é prolongado para toda a usinagem proposta, com o avanço gradual do desgaste, isso pode estar relacionado ao raio gerado pelo tratamento, que contribui para a estabilidade mecânica, pode-se dizer que o processo de polimento proporcionou uma suavização no gume, visto na fase de pré-testes. Esta suavização no gume ou raio no gume não é presente nas ferramentas sem tratamento, estas ferramentas possuem o gume afiado, este gume acaba absorvendo mais esforços mecânicos durante a usinagem, ocasionando uma maior evolução do desgaste, principalmente no início da usinagem onde o gume está se adaptando ao processo.

O desgaste linear está relacionado com o processo de tratamento de gume, segundo estudo realizado por (WANG et al., 2020) o desgaste linear prolonga consideravelmente a vida útil da ferramenta, contribui para uma melhor distribuição dos esforços mecânicos sofridos no processo de usinagem.

Comparando com estudos publicados como (BOUZAKIS et al., 2014) que comparou o processo de polimento com cerdas abrasivas a diferentes tratamentos e aços, obteve nas melhores condições um desempenho superior de 30 %. Neste trabalho o desempenho da ferramenta chegou a 15 % superior em vida útil comparado a fresas sem tratamento, algumas literaturas trazem desempenhos

maiores, mas este percentual encontrado não se torna menos significativo, comparado a trabalhos correlatos como o de Ost (2016) por exemplo, o autor aplicou um tratamento de gume com esponjas abrasivas, e não obteve melhora da vida útil da ferramenta. Outra referência neste mesmo sentido é Silva (2018), aplicando diferentes folhas de acabamento 3M Scotch Brite teve um decréscimo na vida útil da ferramenta. Outra comparação é BUCKELL (2019) que com o mesmo material usado por Silva (2018), porém em formato de discos e com a aplicação de rotação, conseguiu um incremento de 21% da vida útil.

Como observado por (RODRÍGUEZ, 2009), o arredondamento precisa estar dentro de um limite, o autor cita que os raios criados por esta técnica precisão estar na faixa de 0,005 a 0,15 mm, para favorecer no desempenho e vida útil da ferramenta. Este raio foi confirmado com 0,06 na fase de pré-testes, ficando dentro do que a literatura traz. Este ponto pode gerar uma discussão, o raio está dentro do proposto pela literatura, porém é conservador, um raio mais próximo a 0,15 mm pode aumentar ainda mais a vida útil da ferramenta. Para atingir raios maiores usando a mesma escova é necessário um maior tempo de tratamento, assim o grão abrasivo age por mais tempo no gume, gerando um maior raio e por consequência um tempo maior de processo e desgaste das cerdas. Uma alternativa para gerar maiores raios seria o aumento da granulometria do grão abrasivo, grãos maiores possuem uma maior remoção de material, o fabricante 3M possui uma escova com granulometria de 6 micron, com o aumento da granulometria o raio gerado é maior, esta referência é observada na fase de pré-testes, quanto maior o grão abrasivo e a rigidez das cerdas maior será o raio gerado no gume da ferramenta.

#### **4.3.2 Avaliação dos desgastes**

Para cada parada de usinagem imagens foram coletadas para a medição e avaliação do desgaste de flanco. O desgaste de flanco se deve pelos mecanismos de desgaste como: abrasão, adesão e microlascamentos.

Independentemente do tipo de desgaste encontrado no gume da ferramenta, quando o desgaste atingisse 0,2 mm ( $VB_{max}$ ) de comprimento em dois gumes da ferramenta, este parâmetro servia como critério para parada dos testes.

As fresas tratadas O6-28 e O6-29 tiveram um comportamento semelhante no desgaste, o desgaste predominante até 15120 mm usinados foi a abrasão, sem a

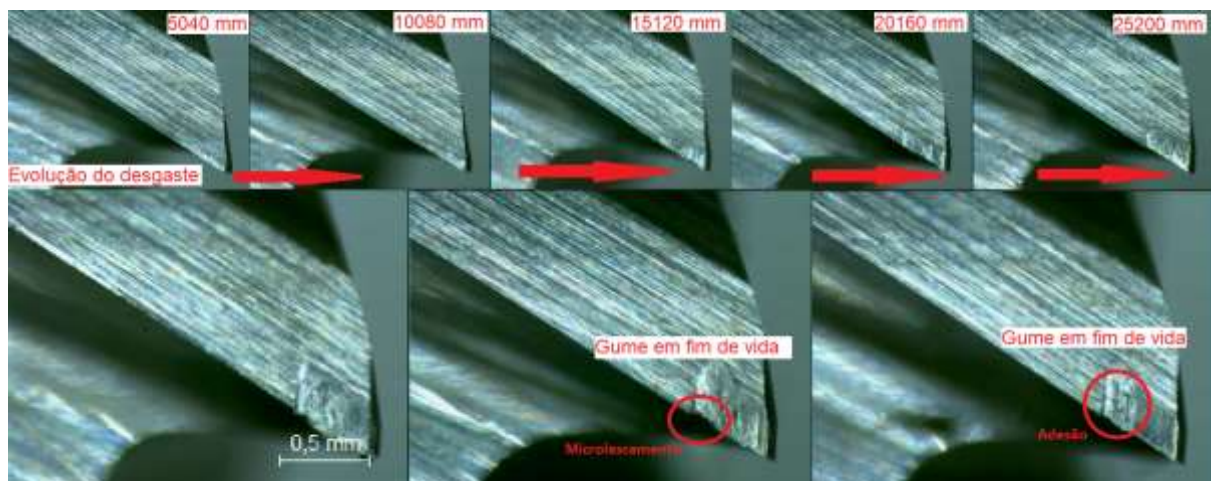


presença de microlascamentos e com pouca presença da adesão. Dado importante visto que BUCKELL (2019) no teste com as ferramentas originais sem tratamento tiveram a presença de microlascamentos desde a primeira parada com 5040 mm.

Em imagens coletadas a partir de 20160 mm é notável a presença maior de adesão, o qual segundo (MACHADO et al., 2015) é um desgaste que leva ao microlascamento da ferramenta, impulsionado pela alta da temperatura no processo, lembrando que a usinagem foi realizada a seco, sem lubrificação. A presença de um líquido lubrificante auxilia no desempenho e prolongamento da vida útil da ferramenta segundo Ost (2016), comparado a uma usinagem a seco a qual este trabalho se propõe.

Na Figura 21 pode-se observar a evolução do desgaste em um gume, na mesma figura encontra-se imagens de alguns gumes em fim de vida após 25200 mm. Observa-se um desgaste linear de acordo com o avanço da usinagem, refletindo a linearidade do Gráfico 3 para o desgaste, o tratamento de gume pode ter contribuído para que apenas a abrasão estivesse presente como desgaste até os 15120 mm, o raio do gume possivelmente criou uma superfície favorável ao corte, refletindo no retardo da presença da adesão e conseqüentemente dos microlascamentos, estes desgastes aceleram o final da vida útil da ferramenta.

Figura 21 – Evolução dos desgastes



Fonte: O autor (2021).

O tratamento de gume por cerdas abrasivas proporcionou uma ferramenta mais confiável, tendo em vista que os desgastes foram amenizados e retardados pela técnica, resultando em uma ferramenta com maior vida útil.

## 5 CONCLUSÃO

A fase de pré-testes teve uma parte importante no entendimento da técnica e a busca por resultados mais assertivos. Nesta fase elucidou-se que a espessura da cerda, o tamanho do grão abrasivo e o tipo de grão abrasivo tem influência nos resultados. A escova com cerdas finas, diâmetro de 1 mm, com grão de carbeto de silício com gramatura de 1 micron teve um melhor desempenho no tratamento de gume. O carbeto de silício mesmo em grãos finos se caracteriza por ser extremamente afiado com alto poder de corte, alterando a rugosidade e a geometria da ferramenta e por consequência arredondando o gume da fresa.

A rugosidade proporcionada pelo tratamento foi de 0,55 Ra, próxima ao encontrado numa ferramenta sem tratamento, sendo aceitável e benéfica para o desempenho da ferramenta. O arredondamento do gume proporcionado pelo tratamento gerou raios de 0,06 mm, o qual foi responsável pela amenização e alguns casos a eliminação das imperfeições do gume, proporcionando uma geometria mais favorável ao corte.

As ferramentas tratadas submetidas ao fresamento do aço P20 tiveram um desempenho superior comparadas a ferramentas sem tratamento. As ferramentas tratadas tiveram um comportamento linear do desgaste, retardando a presença de desgastes com a adesão e microlascamentos, as fresas tratadas tiveram um incremento de 15,30 % de vida útil, comparadas a ferramentas da mesma linha sem tratamento. O processo de tratamento de gume por polimento com escovas de cerdas abrasivas se mostrou eficaz, trazendo um maior desempenho e vida útil para a ferramenta.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nos resultados obtidos com este trabalho, alguns estudos complementares são sugeridos:

- a) avaliar o desempenho destas escovas com rotações maiores, tendo em vista que seu limite é 20.000 rpm.
- b) avaliar a viabilidade de um equipamento para o uso das escovas, tornando o processo automático.
- c) avaliar o comportamento da escova com 6 microns no processo de tratamento de gume.
- d) avaliar a viabilidade da fabricação destas escovas, pelo processo de injeção, tendo a versatilidade de testar outros polímeros e granulometrias de grãos abrasivos.

## REFERÊNCIAS

3M (USA). **3M™ Radial Bristle Brush**. 2001. Disponível em: <https://docs.rs-online.com/3dbe/0900766b8172cfbc.pdf>  
Acesso em: 08 maio de 2021

AURICH, J. C.; EFFGEN, C.; KIRSCH, B. Cutting edge preparation with elastic bonded superabrasive grinding wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1, 2016.

BORDIN, F. M.; ZEILMANN, R. P. **Effect of the cutting edge preparation on the surface integrity after dry drilling**. Procedia CIRP. **Anais...2014**

BOUZAKIS, K. D. et al. Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 7, n. 3, 2014.

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

DE PELLEGRIN, D. V.; STACHOWIAK, G. W. **Abrasiveness of particles measured by Cone-Fit Analysis (CFA)**. Tribology Series. **Anais...2001**

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. Customized cutting edge preparation by means of grinding. **Precision Engineering**, v. 37, n. 3, 2013.

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

DROZDA T. J., WICK, C. (Ed.), **Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Machining**. 4. ed. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers. v. 1, 1983.

ELBESTAWI, M. A. METAL CUTTING THEORY AND PRACTICE. **Machining Science and Technology**, v. 2, n. 2, 1998.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais** São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FONTANIVE, F.; ZEILMANN, R. P.; SCHENKEL, J. D. Surface quality evaluation after milling Inconel 718 with cutting edge preparation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 1–4, 2019.

KREBS, E. et al. High-quality cutting edge preparation of micromilling tools using wet abrasive jet machining process. **Production Engineering**, v. 12, n. 1, 2018.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda, 2015.

MANRICH, S. Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. **Artliber**, 2013.

MIKELL P. GROOVER. **Fundamentals Of Modern Manufacturing: Materials Processes, And Systems (2nd ed.)**. **John Wiley & Sons**, 2007.

MITSUBISHI MATERIALS. **TERMINOLOGIA DAS FRESAS DE TOPO**. 1999.

Disponível em:

[http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical\\_information/information/endmill\\_terminology.html](http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/endmill_terminology.html)

Acesso em: 30 maio de 2021

NEE, A. Y. C. **Handbook of manufacturing engineering and technology**. [s.l: s.n.].

NIKISHECHKIN, P.; GRIGORIEV, N.; CHERVONNOVA, N. Construction of a specialized control system for brush machine and rounding the cutting edges of a metal cutting tool. **MATEC Web of Conferences**, v. 298, 2019.

OVERHOLSER, R. W.; STANGO, R. J.; FOURNELLE, R. A. Morphology of metal surface generated by nylon/abrasive filament brush. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 2, 2003.

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

RODRÍGUEZ, C. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing**. [s.l: s.n.].

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

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

UHLMANN, E. et al. **Effects of Different Cutting Edge Preparation Methods on Micro Milling Performance**. *Procedia CIRP. Anais...2016*

WANG, W. et al. Effect of edge preparation technologies on cutting edge properties and tool performance. **International Journal of Advanced Manufacturing**

**Technology**, v. 106, n. 5–6, 2020.

ZEILMANN R. P., SANTIN R., NICOLA G. L., **Qualidade superficial em fresamento de topo esférico. Máquinas e Metais**, Outubro:152- 159, 2006.

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

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

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