

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

**RONALDO GIRARDELO**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME POR ARRASTE SOBRE A VIDA DA  
FERRAMENTA E A QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DO AÇO P20**

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**RONALDO GIRARDELO**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME POR ARRASTE SOBRE A VIDA DA  
FERRAMENTA E A QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DO AÇO P20**

Trabalho de conclusão de curso da disciplina de  
TCC II (MEC0291AN), apresentado à  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso  
Zeilmann

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**RONALDO GIRARDELO**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME POR ARRASTE SOBRE A VIDA DA FERRAMENTA E A QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DO AÇO P20**

Trabalho de conclusão de curso da disciplina de TCC II (MEC0291AN), apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**Aprovado em 12/12/2019.**

**Banca Examinadora**

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

Prof. Dr. Leandro Luís Corso  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Celso Ferrarini  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

*“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.*  
*(Leonardo da Vinci)*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Renato Luiz Girardelo e Zolema Garibaldi Girardelo pelo apoio, compreensão e por todos os ensinamentos de vida que sempre recebo.

Ao amigo Matias Meneguzzo, pela parceria em toda a longa jornada acadêmica e pelo apoio em todos os momentos difíceis.

Ao amigo William Buckell, pelos ensinamentos e orientações durante a realização do trabalho.

Ao orientador, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, pela disponibilidade, orientações e ensinamentos durante todo o trabalho de conclusão de curso.

Ao técnico de laboratório, Gaston Henrique Rossa pelo auxílio na execução dos ensaios.

Aos membros do Grupo de Usinagem de Caxias do Sul pelo auxílio na preparação dos materiais e na execução dos ensaios, e pela disposição em ajudar.

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

À empresa Seco Tools pela doação das ferramentas e à empresa Secta Tools pelo auxílio no processo de reafiação das fresas de topo.

À todos que de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho, meus agradecimentos.

## RESUMO

Este trabalho analisou a influência do tratamento de gume através do método de acabamento por arraste sobre o desgaste da ferramenta e o acabamento superficial da peça. Tratamentos dessa natureza são comumente aplicados visando alta produtividade e eficiência no controle dos processos de usinagem. Com eles, é possível obter um ganho de vida útil para as ferramentas e também uma confiabilidade no processo. Tendo em vista esses benefícios, e utilizando o *know-how* adquirido em trabalhos anteriores, o trabalho apresentou uma proposta de melhoria para uma mídia abrasiva alternativa, material responsável pela geração do arredondamento no gume e pelo beneficiamento da superfície. A mídia em questão foi produzida com uma faixa controlada de granulometria para a casca de amendoim e, após alguns pré-testes, as fresas de topo foram tratadas. As ferramentas foram avaliadas antes e após o tratamento por arraste, e medições de rugosidade e textura foram executados ao final dos ensaios. Os resultados obtidos foram analisados e comparados com trabalhos anteriores. As ferramentas apresentaram um comprimento usinado acima do que foi encontrado em ferramentas com o tratamento da mesma mídia em sua primeira versão. A principal vantagem ficou por conta dos valores baixos e estáveis para a rugosidade.

**Palavras-Chave:** Fresamento, Tratamento de gume, Acabamento por arraste, Mídias abrasivas, Desgaste, Qualidade superficial.

## ABSTRACT

This work analyzed the influence of cutting edge preparation through the drag finishing method on tool wear and surface finish of the workpiece. Treatments of this nature are commonly applied aiming at high productivity and efficiency in the control of machining processes. With them, it's possible achieve tool life gains as well as process reliability. With these benefits, and using the know-how acquired in previous work, the work presented an improvement proposal for an alternative abrasive media, material responsible for the generation of rounding on the edge and for the improvement of surface. The media was produced with a controlled grain size range for the peanut shell and, after some pre-testing, the endmills were treated. The tools were evaluated before and after the drag finishing process, and roughness and texture measurements were performed at the end of the tests. The obtained results were analyzed and compared with previous works. The tools had a machined length above what was found in tools dealing with the same abrasive media in its first version. The main advantage was the low and stable values for roughness.

**KeyWords:** Milling, Cutting edge preparation, Drag finishing, Abrasive medias, Wear, Surface Quality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fresamento frontal e fresamento periférico .....	19
Figura 2 - Macro-geometria de fresas de topo reto .....	21
Figura 3 - Geometria do gume e suas variações .....	22
Figura 4 - Fator de forma da geometria do gume .....	22
Figura 5 – Condição inicial e final do gume .....	24
Figura 6 - Alteração do cavaco.....	25
Figura 7 - Efeito de recalque .....	25
Figura 8 - Principais processos para tratamento de gume .....	26
Figura 9 - Movimentos do processo de acabamento por arraste .....	27
Figura 10 – Curva de comportamento de desgaste .....	30
Figura 11 - Caracterização dos tipos de desgaste .....	31
Figura 12 - Relação dos mecanismos de desgaste com a temperatura de corte .....	33
Figura 13 - Representação dos elementos superficiais e subsuperficiais .....	35
Figura 14 - Desvios de forma de uma superfície usinada.....	35
Figura 15 - Representação do perfil de rugosidade .....	37
Figura 16 - Representação esquemática das etapas experimentais.....	39
Figura 17 – Fresa de topo inteiriça de metal-duro.....	42
Figura 18 – Flanco da ferramenta B5 na condição reafiada .....	45
Figura 19 – Lascamento de um dos gumes da ferramenta B13.....	46
Figura 20 - Comparação de ferramenta com e sem tratamento.....	46
Figura 21 - Comparativo do efeito do tratamento no topo e na face.....	47
Figura 22 – Parâmetros de rugosidade para o início da vida da ferramenta.....	48
Figura 23 - Parâmetros de rugosidade para o fim de vida da ferramenta.....	49
Figura 24 - Textura e perfil de rugosidade da fresa B5 .....	50
Figura 25 - Textura e perfil de rugosidade da fresa B13 .....	50
Figura 26 - Curvas de comportamento de desgaste .....	52
Figura 27 – Comparativo de comprimento usinado .....	53
Figura 28 - Mecanismo de abrasão após 30 metros usinados.....	54
Figura 29 - Mecanismo de adesão .....	54

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Condições de tratamento para as ferramentas .....	41
Tabela 2 - Ferramentas utilizadas nos ensaios.....	45

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Grandezas influentes sobre a qualidade superficial na usinagem .....	34
---	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_\alpha$	ângulo de incidência [°]
$A_\gamma$	ângulo de saída [°]
$\beta$	ângulo de cunha [°]
$\gamma$	ângulo de saída nominal [°]
$\gamma_e$	ângulo de saída efetivo [°]
$a_e$	profundidade de corte radial [mm]
$a_p$	profundidade de corte axial [mm]
$f_z$	avanço por gume [mm/gume]
$h$	espessura do cavaco não cisalhado [mm]
$h_c$	espessura do cavaco [mm]
$K$	fator de forma
$KB$	largura da cratera [mm]
$KM$	afastamento médio da cratera [mm]
$KT$	profundidade da cratera [mm]
$l_e$	comprimento de medição unitário [mm]
$l_m$	comprimento total de medição [mm]
$l_t$	comprimento de teste [mm]
$l_v$	comprimento unitário inicial de medição [mm]
$n$	rotação [rpm]
$P$	força de recalçamento
$R_a$	desvio médio aritmético de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
$R_{HA}$	raio do planetário
$R_{max}$	profundidade máxima individual de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
$r_n$	raio do gume da ferramenta de corte [mm]
$R_p$	altura máxima de rugosidade em relação à média [ $\mu\text{m}$ ]
$R_q$	desvio médio quadrático de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
$R_v$	profundidade máxima de rugosidade em relação à média [ $\mu\text{m}$ ]
$R_w$	raio do planetário
$R_y$	profundidade máxima individual de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	média aritmética das rugosidades singulares [ $\mu\text{m}$ ]
$S_\alpha$	comprimento do arredondamento no flanco da ferramenta [ $\mu\text{m}$ ]
$S_\gamma$	comprimento do arredondamento na face da ferramenta [ $\mu\text{m}$ ]

$SV_\alpha$	deslocamento do gume em relação ao flanco da ferramenta [mm]
$SV_\gamma$	deslocamento do gume em relação à face da ferramenta [mm]
$t_c$	tempo de corte [min]
$V_B$	desgaste de flanco [mm]
$VB_{max}$	desgaste de flanco máximo [mm]
$v_c$	velocidade de corte [m/min]
$Z_i$	rugosidade parcial [ $\mu\text{m}$ ]
$Z_s$	usinabilidade relacionada ao cavaco
$Z_v$	usinabilidade relacionada ao desgaste

## LISTA DE ABREVIATURAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CA	Casca de amendoim
LNTP	Laboratório de Novas Tecnologias de Produção
UCS	Universidade de Caxias do Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	17
1.2	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO .....	17
1.3	OBJETIVO .....	18
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>18</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1	FRESAMENTO .....	19
<b>2.1.1</b>	<b>Fresamento de topo reto</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Macro-geometria da ferramenta</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Geometria do gume</b> .....	<b>21</b>
2.2	TRATAMENTO DE GUME .....	23
<b>2.2.1</b>	<b>Processos para tratamento de gume</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Acabamento por arraste</b> .....	<b>27</b>
2.2.2.1	Mídias abrasivas.....	28
2.3	USINABILIDADE .....	29
<b>2.3.1</b>	<b>Vida da ferramenta</b> .....	<b>29</b>
2.3.1.1	Mecanismos e tipos de desgaste na usinagem .....	30
<b>2.3.2</b>	<b>Qualidade superficial</b> .....	<b>33</b>
2.3.2.1	Textura .....	35
2.3.2.2	Rugosidade.....	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>38</b>
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	38
3.2	TRATAMENTO DAS FERRAMENTAS.....	39
<b>3.2.1</b>	<b>Dados fixos de entrada</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Variáveis de entrada</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Variáveis de saída</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Ferramentas</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Equipamentos</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Material e corpo de prova</b> .....	<b>43</b>

<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
4.1	OBTENÇÃO DAS MÍDIAS.....	44
4.2	TRATAMENTO DAS FERRAMENTAS.....	44
<b>4.2.1</b>	<b>Caracterização das ferramentas.....</b>	<b>45</b>
4.3	RUGOSIDADE E TEXTURA DO AÇO P20 .....	47
4.4	VIDA DA FERRAMENTA.....	51
<b>4.4.1</b>	<b>Curvas de comportamento de desgaste das ferramentas .....</b>	<b>51</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Mecanismos de desgaste .....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os métodos de fabricação, em escala industrial, estão sempre sendo submetidos a estudos e melhorias que visam o aumento da produtividade e da qualidade. Isso também ocorre com a usinagem, um dos principais processos de manufatura presentes na indústria.

Os custos de produção inerentes à usinagem podem ser divididos em várias categorias, entre elas: mão de obra, máquina (depreciação, manutenção, energia consumida), matéria prima e ferramentas (FERRARESI, 1970). Estas últimas, por sua vez, passaram por inúmeras melhorias ao longo dos anos, apresentando avanços significativos no desempenho e aumentando a competitividade.

No entanto, mesmo com tantos avanços nesta área ao longo do último século, estudos acerca de ferramentas continuam sendo realizados para que o processo consiga seguir evoluindo. Entre todas as variáveis, Rodriguez (2009) explica que o desenvolvimento de novos conceitos para melhoria em ferramentas de corte é dividido em quatro aspectos: Otimização da geometria, engenharia da superfície e tecnologia de revestimento, novos materiais (substrato), e tratamento de gume, que, entre todos, é o que recebe menos atenção até o momento.

E é justamente nesta região que a fabricação das ferramentas de corte traz uma série de defeitos, como micro-trincas, rebarbas e outras irregularidades, além de defeitos superficiais e baixa resistência mecânica (RODRIGUEZ, 2009). Nesta linha de estudo, autores como Rodriguez (2009), Tikal (2009), Bogdan et al. (2013) e Denkena e Biermann (2014) apresentam métodos de tratamento de gume que surgem como alternativa na correção destes defeitos e na geração de uma geometria melhor definida.

Dentre todos eles, os procedimentos mais comuns de tratamento utilizam o princípio mecânico de remoção de material e podem ser adotados para a preparação do gume, apresentando resultados satisfatórios no aumento da vida útil da ferramenta. Porém, considerando todas as variáveis existentes na usinagem, muito ainda precisa ser testado, avaliado e desenvolvido, para que este processo de manufatura consiga se manter competitivo e ter sua parcela no mercado.

Levando em consideração os processos mais comuns, o tratamento por arraste tem a vantagem de garantir uma boa repetibilidade e uniformidade no arredondamento do gume. Nele, a ferramenta é inserida em um meio abrasivo enquanto executa movimento circular (BOGDAN et al., 2013). Com base nisso, o presente trabalho surge com a finalidade de aprofundar ainda mais os estudos no tratamento de gume e apresentar uma proposta de melhoria na aplicação da técnica de acabamento por arraste. Os ensaios serão desenvolvidos utilizando o processo de

fresamento de topo.

Além da revisão bibliográfica, toda a metodologia é apresentada no decorrer do trabalho, que conta ainda com a proposta de estudo, os resultados e conclusões.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Estudos comprovam que efeitos positivos são alcançados a partir do tratamento de gume em ferramentas de usinagem. Essa técnica pode utilizar diferentes métodos e princípios de remoção de material, e atua na alteração da micro-geometria da ponta, que mantém influência sobre o desempenho do ferramental. Atingindo uma forma adequada do gume há também um aumento na resistência ao desgaste, na vida útil da ferramenta e na confiabilidade do processo (DENKENA e BIERMANN, 2014).

Tratamentos deste tipo já ocorrem em várias partes do mundo, tendo em vista a economia gerada através de menores tempos de usinagem. Porém, este tipo de procedimento ainda é pouco realizado no Brasil. Por ser pouco conhecido e por necessitar, na grande maioria das vezes, de máquinas e insumos específicos, o tratamento de gume ainda não se faz presente de forma ampla na indústria nacional.

No caso do tratamento com acabamento por arraste, o custo com máquinas e a dificuldade de obtenção das mídias abrasivas que realizam a remoção do material podem ser citados como uma barreira para a implementação desse método.

Tendo como base estudos anteriores, o trabalho surge visando um aumento no desempenho e na vida útil para ferramentas de fresamento de topo reto. Além disso, há também a busca por estabilidade e bons níveis no acabamento da peça, sendo estes requisitos importantes para manter um padrão de qualidade na usinagem. Sendo assim, o presente trabalho busca alternativas que possibilitem a aplicação deste processo através de uma maneira mais simplificada. Facilitando o acesso ao tratamento, seja por meio de novas formas de aplicação ou melhorias na aplicação de mídias alternativas, como estudado por Carrer (2018), este trabalho pretende gerar uma melhora na utilização do processo.

## 1.2 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

A Universidade de Caxias do Sul, criada em 1967, é a mais antiga Instituição de Ensino Superior da região. A UCS mantém unidades em 8 cidades e conta hoje com 78 cursos de graduação, 18 de mestrado e 10 de doutorado. Sempre trabalhando em parceria com a indústria

da região, a instituição permite abordagens reais durante a vida acadêmica.

Todo o estudo será desenvolvido em parceria com o Grupo de Usinagem (GUS), no Laboratório de Usinagem da universidade, incluindo testes e variações no processo, preparação das mídias e das ferramentas, medições de rugosidade superficial e medições de desgaste nas fresas de topo utilizadas nos ensaios.

### 1.3 OBJETIVO

#### 1.3.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo analisar a influência do tratamento de gume pelo método de acabamento por arraste, buscando um aprimoramento de mídias alternativas, avaliando qualidade superficial da peça e vida da ferramenta.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para o cumprimento do objetivo geral, uma série de objetivos específicos são propostos:

- a) estudar os processos de tratamento e suas consequências na modificação da geometria do gume;
- b) entender as variáveis que influenciam o processo de acabamento por arraste;
- c) apresentar uma proposta de melhoria na aplicação do tratamento de gume por arraste através do aprimoramento de mídias abrasivas alternativas;
- d) comparar o método de tratamento utilizado com a forma comercial de aplicação;
- e) avaliar os efeitos do método de aplicação proposto em relação à qualidade superficial da peça; e
- f) avaliar os efeitos do método de aplicação proposto em relação à vida útil da ferramenta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

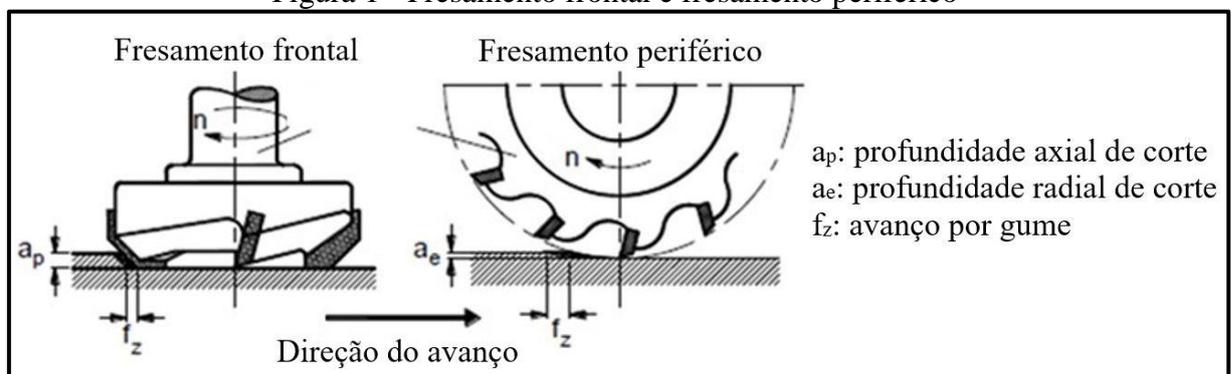
### 2.1 FRESAMENTO

Entre todos os processos de usinagem, o fresamento se destaca pela versatilidade. Ao longo dos anos, evoluções em máquinas e softwares permitiram que ele fosse capaz de gerar praticamente qualquer tipo de perfil. Hoje é possível realizar furações, roscas, cavidades e outras superfícies que antes eram furadas, torneadas ou rosqueadas com macho.

Neste processo, a remoção de material acontece de um modo intermitente onde a ferramenta, que normalmente apresenta múltiplos gumes, realiza o movimento rotativo enquanto a peça executa o movimento de avanço (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999; KLOCKE, 2017; STEMMER, 2005; KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999), as operações podem ser classificadas em dois grandes grupos: fresamento periférico e fresamento frontal. No primeiro, os gumes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta e o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo usinada. As fresas, neste caso, são denominadas de cilíndricas ou tangenciais. Por outro lado, no fresamento frontal, os gumes ativos estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada. Desta maneira, as ferramentas são chamadas de fresas frontais ou de topo.

Figura 1 - Fresamento frontal e fresamento periférico



Fonte: Adaptado de Klocke (2017).

Em uma subdivisão ainda maior do que as classificações básicas de fresamento frontal e periférico, é possível encontrar fresas com as mais variadas geometrias, cada qual com a finalidade de executar uma única ou um grupo de operações (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999).

Além do mais, as fresas podem ser inteiriças, quando compostas por um único material no gume e na haste, ou intercambiáveis, quando utilizam insertos de metal-duro que podem ser substituídos sem a necessidade de novo zeramento da ferramenta (KLOCKE, 2017).

### **2.1.1 Fresamento de topo reto**

Com uma ampla gama de aplicações surge o fresamento de topo reto, considerado um processo contínuo, circunferencial e frontal, que utiliza como ferramenta uma fresa de topo. Sua grande versatilidade possibilita o emprego na execução de matrizes, rasgos e cortes de todos os tipos e tamanhos (KLOCKE, 2017).

Normalmente operando com fresas de pequenos diâmetros, e aliado ao fato de que as mesmas ficam presas somente em uma extremidade, o método possui menor rigidez do que outras formas convencionais de fresamento. Diante disso, reduções nas taxas de avanço podem ser necessárias para reduzir a deflexão da ferramenta (BRALLA, 2008). Ainda, como o fresamento ocorre com um ângulo de posição de  $90^\circ$ , a componente radial da força de usinagem é predominante no processo, intensificando a deflexão da ferramenta. O aumento desta força produz vibrações, ocasionando uma instabilidade dimensional e um acabamento superficial indesejado.

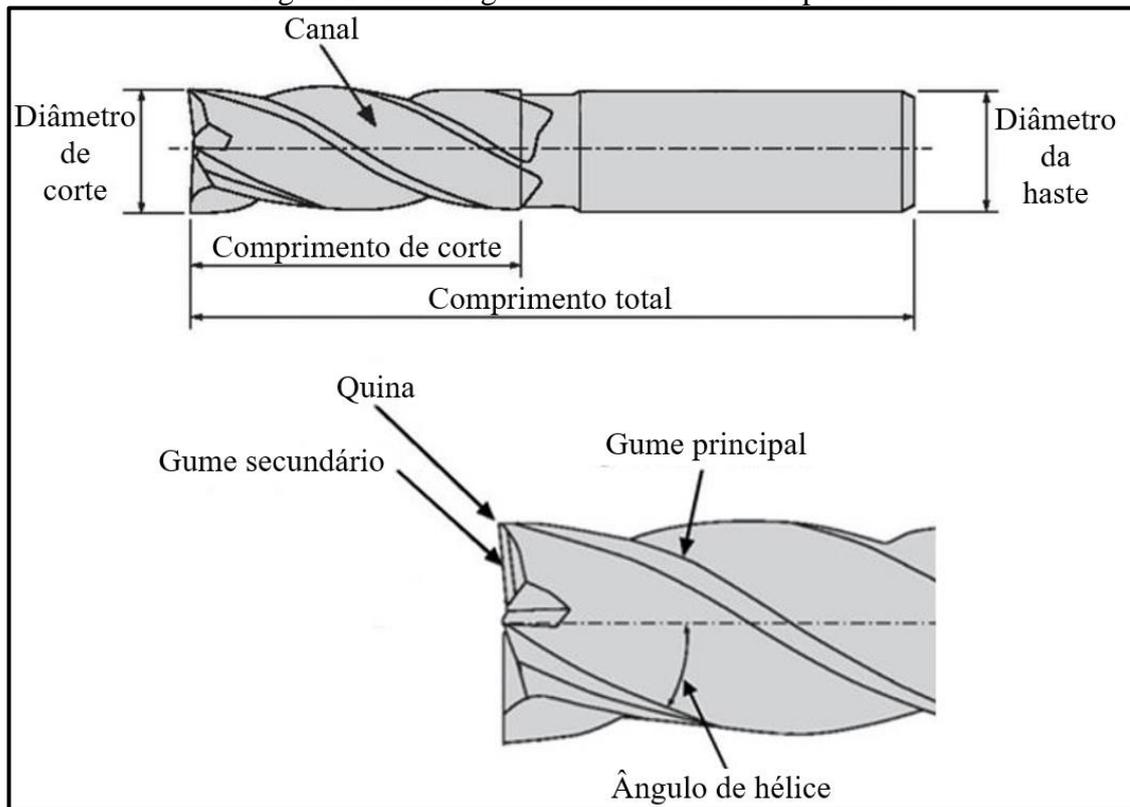
Para a execução deste tipo de fresamento, uma vasta gama de fresas de topo aparecem como opção. Isso se tornou possível através de inúmeros estudos que proporcionaram melhorias na geometria das ferramentas, geometria esta que é dividida em macro-geometria e geometria de gume, sendo que a última pode ser separada ainda em meso e micro-geometria (RODRÍGUEZ, 2009).

### **2.1.2 Macro-geometria da ferramenta**

Os avanços tecnológicos promoveram evoluções significativas na macro-geometria das ferramentas ao longo dos anos. Ela é composta por elementos como ângulos de corte, ângulos de hélice, geometrias para quebra de cavacos e raio de quina. O desenvolvimento dessas variáveis é fundamental já que as mesmas são influentes nos esforços gerados no processo, na refrigeração, lubrificação e no fluxo de cavacos durante o corte (RODRÍGUEZ, 2009).

A Figura 2 apresenta, de forma simplificada, algumas características importantes que compõem a macro-geometria das fresas de topo reto.

Figura 2 - Macro-geometria de fresas de topo reto



Fonte: Adaptado de Rebeyka (2016).

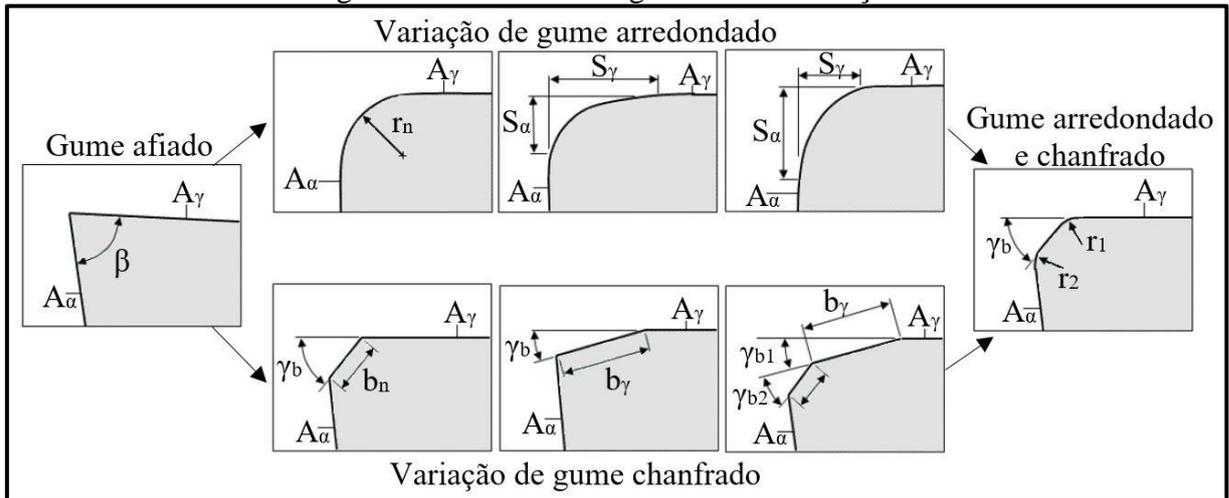
### 2.1.3 Geometria do gume

A nível microscópico está a geometria do gume, composta pela meso-geometria e micro-geometria. Na primeira, os contornos que correspondem à superfície convexa do gume (arredondamento), gerada pelo processo de preparação, estão compreendidos. Já a micro-geometria inclui a microtopografia da aresta de corte e a microtopografia das superfícies de flanco e face, que se apresentam nas proximidades do gume (RODRÍGUEZ, 2009).

O perfil do gume possui uma influência considerável na usinagem já que está diretamente ligado com o desgaste de flanco, ou seja, com a vida útil da ferramenta. Uma preparação adequada aumenta a estabilidade do gume, gerando uma melhor resistência ao desgaste, aumentando a resistência mecânica e reduzindo lascamentos e trincas (DENKINA e BIERMANN, 2014).

A forma mais comum, proveniente do processo de afiação durante a fabricação das ferramentas, apresenta aresta viva. A partir dela, variações ocorrem pela presença de raios ou chanfros, ou até mesmo a combinação de ambos (RODRÍGUEZ, 2009). A Figura 3 ilustra diversas geometrias que podem ser geradas através da aplicação de arredondamentos e chanfros. Ela apresenta ainda os ângulos de incidência ( $A_\alpha$ ) e de saída ( $A_\gamma$ ).

Figura 3 - Geometria do gume e suas variações

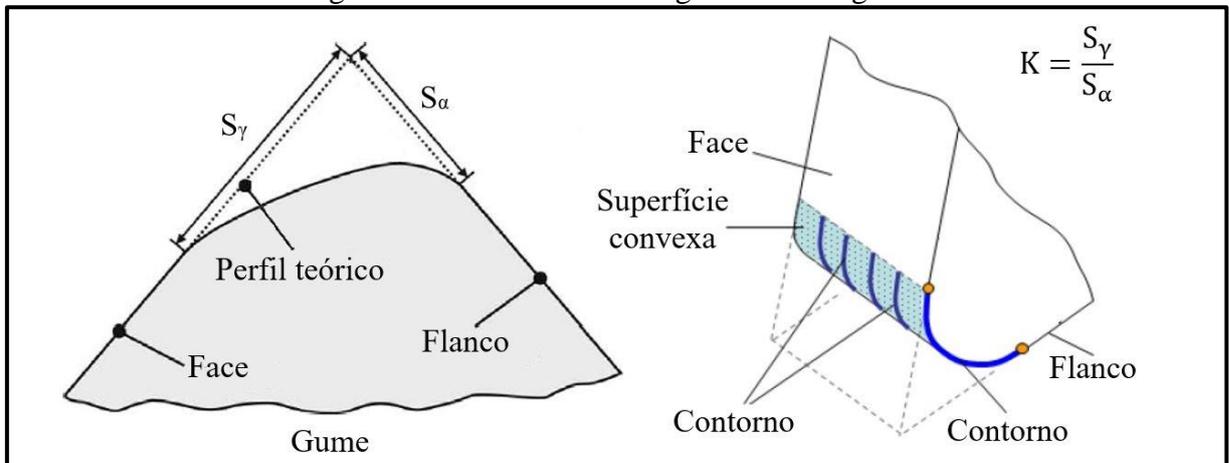


Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

Zhao et al. (2017), no torneamento de aço AISI 52100, constataram que a variação do tamanho do arredondamento no gume da ferramenta possui influência nos esforços de corte, na vida da ferramenta e na qualidade superficial.

Para a completa caracterização do gume arredondado, a razão entre o comprimento do arredondamento na face ( $S_\gamma$ ) e no flanco ( $S_\alpha$ ) da ferramenta é utilizado (Figura 4). Este parâmetro é conhecido como fator de forma ( $K$ ) e tem a função de determinar a inclinação do arredondamento no gume (DENKENA e BIERDMANN, 2014).

Figura 4 - Fator de forma da geometria do gume



Fonte: Adaptado de Denkena e Biermann (2014) e Rodríguez (2009).

Denkena, Lucas e Bassett (2011), concluíram que o tamanho de  $S_\alpha$  retém a maior influência na geração dos esforços e que um raio mais voltado para a face ( $K > 1$ ), apresenta os melhores resultados para a vida da ferramenta, corroborando com Paucksch (2008).

Ainda, Denkena, Koehler e Rehe (2012), no fresamento de aço 42CrMo4 com ferramentas de metal-duro, constataram que o comportamento do desgaste tem uma forte relação com o fator de forma (K). Na alteração da geometria para  $K < 1$  o desgaste de flanco é predominante devido ao aumento do atrito entre peça e ferramenta.

## 2.2 TRATAMENTO DE GUME

O aumento da eficiência no processo de corte está diretamente relacionado às condições do gume da ferramenta. Nesta região, a presença de um raio ou um chanfro, de dimensões adequadas, provoca uma alteração na temperatura e nas forças de corte. Como consequência, a qualidade superficial do componente usinado e a vida da ferramenta são diretamente afetadas (VENTURA et al., 2016).

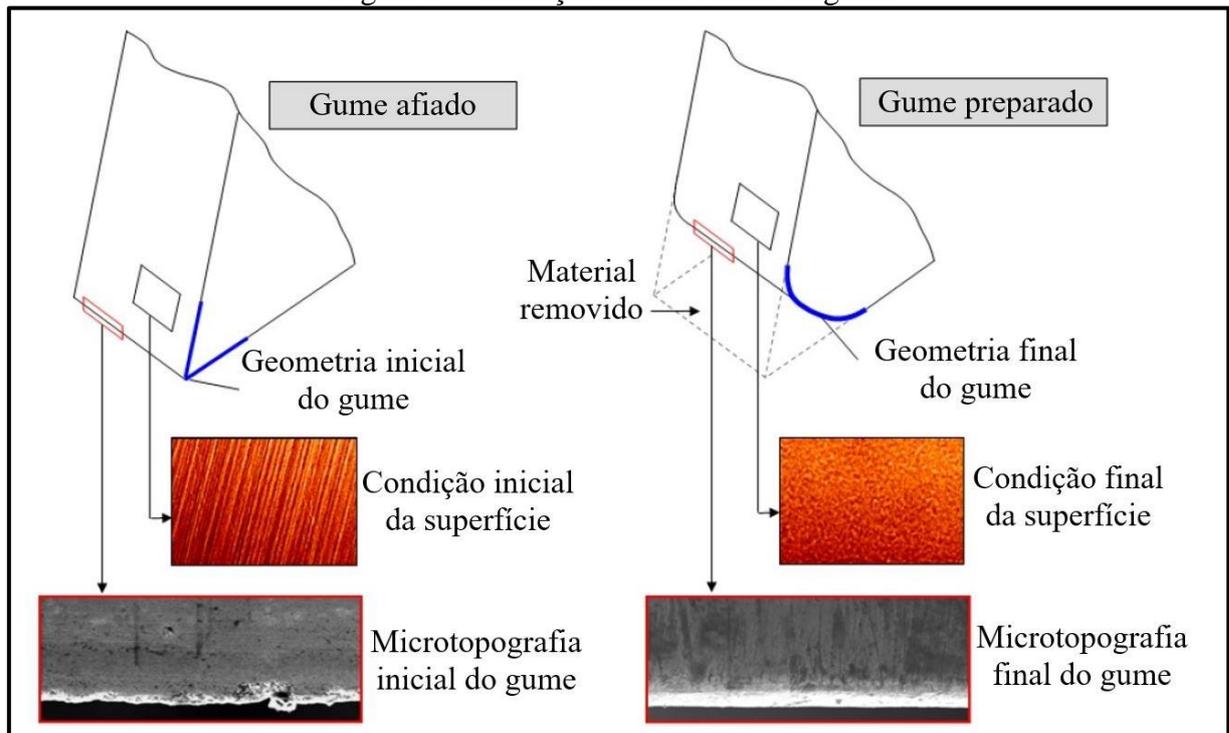
A preparação do gume prolonga a vida da ferramenta, permite uma redução de custos através de menores tempos de usinagem e causa uma redução na rugosidade superficial da peça (KLOCKE e KRATZ, 2005; BIERMANN e TERWEY, 2008; RODRÍGUEZ, 2009). O tempo de vida da ferramenta, por exemplo, pode ser prolongado de 20 a 300% a partir de uma modificação adequada no gume (ZHAO et al., 2016).

O tratamento é responsável também por um aumento na resistência do mesmo, redução de lascas e trincas, e preparação da superfície para a deposição da cobertura (RODRÍGUEZ, 2009). Essa modificação consiste na geração de um contorno, alterando a microtopografia e a microestrutura da superfície que se encontra na vizinhança do gume. Através disso, irregularidades do processo de fabricação das ferramentas, como micro-trincas e rebarbas, são removidas (RODRÍGUEZ, 2009; ZHAO et al., 2016). Um exemplo das modificações é apresentado na Figura 5.

Os efeitos do arredondamento também são importantes para o microfresamento. Nesse caso, o raio gerado impede que o gume fique preso no material da peça de trabalho, causando uma diminuição da amplitude de vibração e, conseqüentemente, aumentando a estabilidade durante o processo de corte (BIERMANN e BASCHIN, 2009).

Como a modificação da micro-geometria da ferramenta altera a distribuição das cargas mecânicas ao longo do gume, vários trabalhos foram produzidos com a finalidade de estudar o comportamento destas forças. Em um deles, Denkena, Lucas e Bassett (2011), evidenciaram que, dependendo do tamanho do raio, o aumento nas forças pode ser de até 40%.

Figura 5 – Condição inicial e final do gume



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

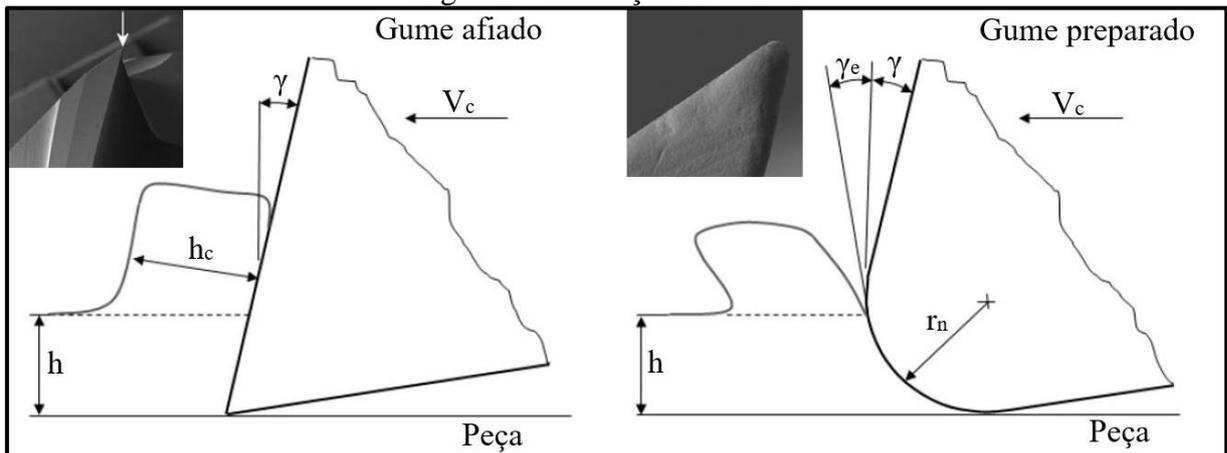
A busca por um tamanho de raio adequado é um dos pontos chave para a obtenção de bons resultados. Zhao et al. (2017) testaram raios de 20, 30 e 40  $\mu\text{m}$  no torneamento de aço AISI 52100. Neste caso, as ferramentas com raios de 30  $\mu\text{m}$  apresentaram os resultados mais satisfatórios para os valores de rugosidade superficial da peça usinada.

Uhlmann et al. (2014) avaliaram desgaste em microfresas com raios de gume de 2, 4 e 8  $\mu\text{m}$ . Os autores constataram que os melhores resultados foram obtidos para as fresas com raio de 8  $\mu\text{m}$ , com redução de 14% no valor do desgaste de flanco máximo ( $VB_{\text{max}}$ ).

Para o fresamento de Inconel 718, Hronek et al. (2018) concluíram que os maiores tempos de vida foram obtidos em ferramentas com o raio de gume de 15  $\mu\text{m}$ . Rech et al. (2005), no fresamento de aço 27MnCr5, constataram que a tensão gerada no substrato da ferramenta aumenta com o aumento do raio e é responsável pela quebra do gume. Neste caso, um raio ideal, capaz de minimizar este efeito, deve estar próximo de 14  $\mu\text{m}$ . De modo geral, valores de raio considerados ótimos estão compreendidos na faixa entre 10 e 20  $\mu\text{m}$  (PAUCKSH, 2008).

A aplicação de um arredondamento proporciona uma transformação na mecânica do corte. Autores como Rodríguez (2009), Biermann, Wolf e Assmuth (2012), Maiss, Grove e Denkena (2017), mostraram que quando a espessura do cavaco não cisalhado ( $h$ ) for muito próxima ao raio do gume ( $r_n$ ), o ângulo de saída efetivo ( $\gamma_e$ ) é sempre negativo, para qualquer ângulo nominal de saída ( $\gamma$ ). A Figura 6 ilustra este fenômeno.

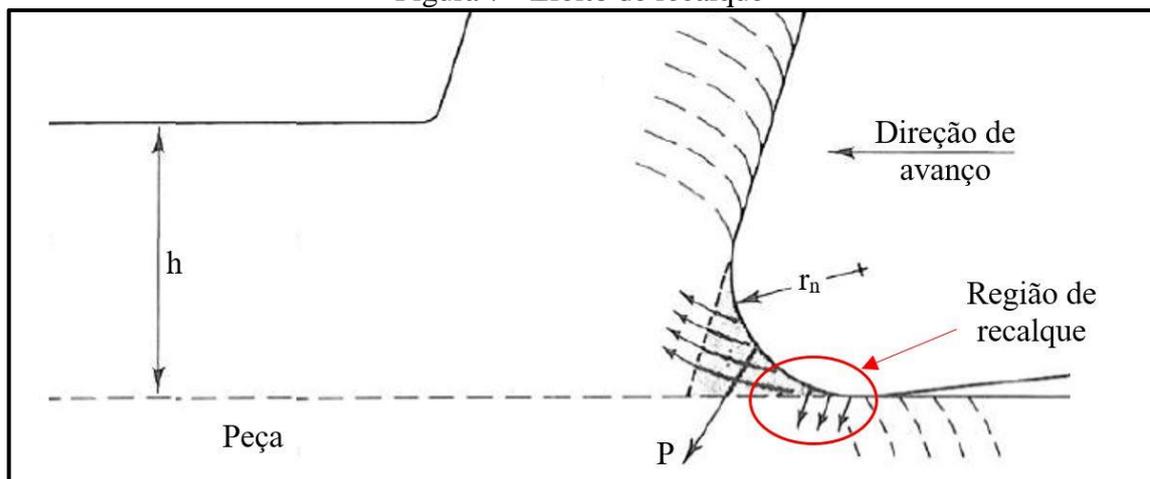
Figura 6 - Alteração do cavaco



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009) e Tikal (2009).

Sob estas condições ocorre um aumento na força de recalque (*ploughing force*), que consiste basicamente numa pequena quantidade de material que se encontra à frente do arredondamento e que é pressionada na direção da peça usinada (Figura 7), aderindo à superfície. Como efeito, a qualidade superficial pode ser negativamente afetada (ALBRETCH, 1960; BIERMANN, WOLF e ASSMUTH, 2012; PAUCKSH, 2008; STEMMER, 2005).

Figura 7 - Efeito de recalque



Fonte: Adaptado de Albrecht (1960).

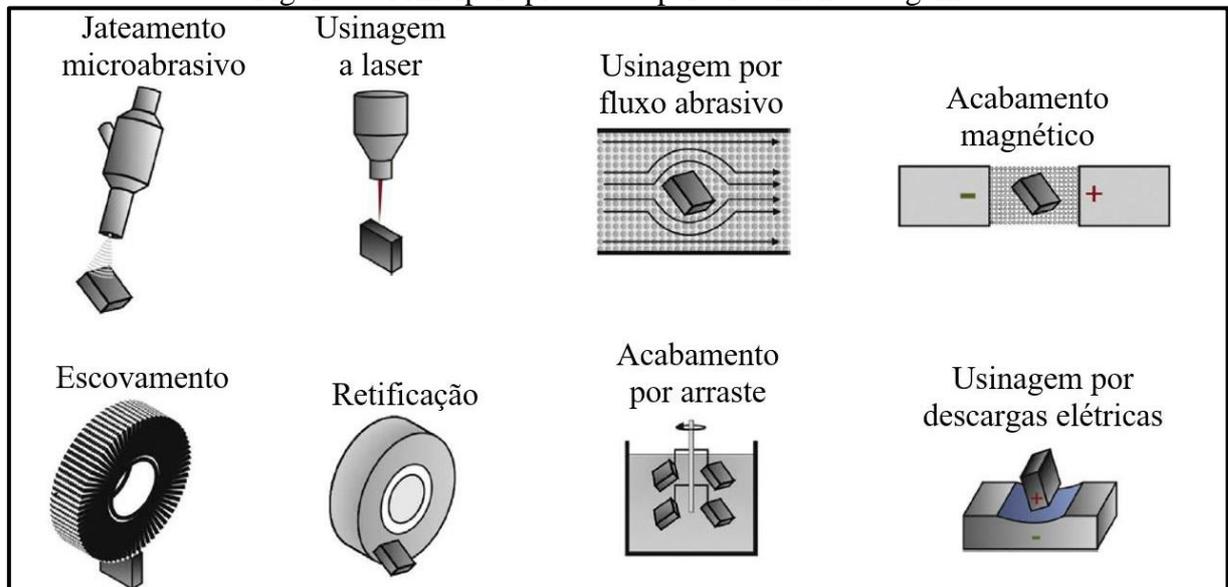
Uma geometria de gume mais definida pode ser obtida por diversos processos, todos com a função de remover material de forma ordenada a fim de atingir os requisitos geométricos especificados para a ferramenta (RODRÍGUEZ, 2009). A escolha do tratamento é dependente do tamanho de arredondamento desejado e da complexidade geométrica da ferramenta.

### 2.2.1 Processos para tratamento de gume

Um processo de preparação adequado deve garantir a qualidade e a reprodutibilidade do gume (RODRÍGUEZ, 2009). Em geral, os custos com a aplicação destes tratamentos ficam entre 10 e 14% do custo de produção da ferramenta (FRIEMUTH, 2002 apud TIKAL, 2009). Já o aumento observado na vida útil durante o fresamento foi de até quatro vezes, comparado às ferramentas sem nenhum tipo de preparação (CORTES, 2009 apud TIKAL, 2009).

Estes métodos de tratamento operam com diferentes fontes de energia e a remoção de material pode utilizar princípios químicos, térmicos ou mecânicos (RODRÍGUEZ, 2009). Entre eles, os que fazem uso da energia mecânica são os mais utilizados (RECH, 2005). Sabe-se ainda que o desgaste de flanco das ferramentas é afetado pelo tipo de preparação aplicada ao gume (VOPAT et al., 2017). A Figura 8 apresenta alguns dos principais processos de tratamento de gume disponíveis no mercado.

Figura 8 - Principais processos para tratamento de gume



Fonte: Adaptado de Denkena e Biermann (2014).

Dependendo do processo utilizado no tratamento, diferentes tamanhos de raio são produzidos. Sendo assim, há uma separação básica em três grupos. Inicialmente, arredondamentos na faixa de 5  $\mu\text{m}$  estão associados a ferramentas afiadas por retificação e sem nenhum tratamento subsequente. Os raios médios, produzidos com dimensões entre 5 e 20  $\mu\text{m}$ , são obtidos por jateamento micro-abrasivo ou acabamento por arraste. E por último, gumes que possuem arredondamento superior a 20  $\mu\text{m}$  são gerados por processos como escovamento (PAUCKSH, 2008; RECH, 2005 apud RISSE, 2006). Entretanto, a complexidade geométrica

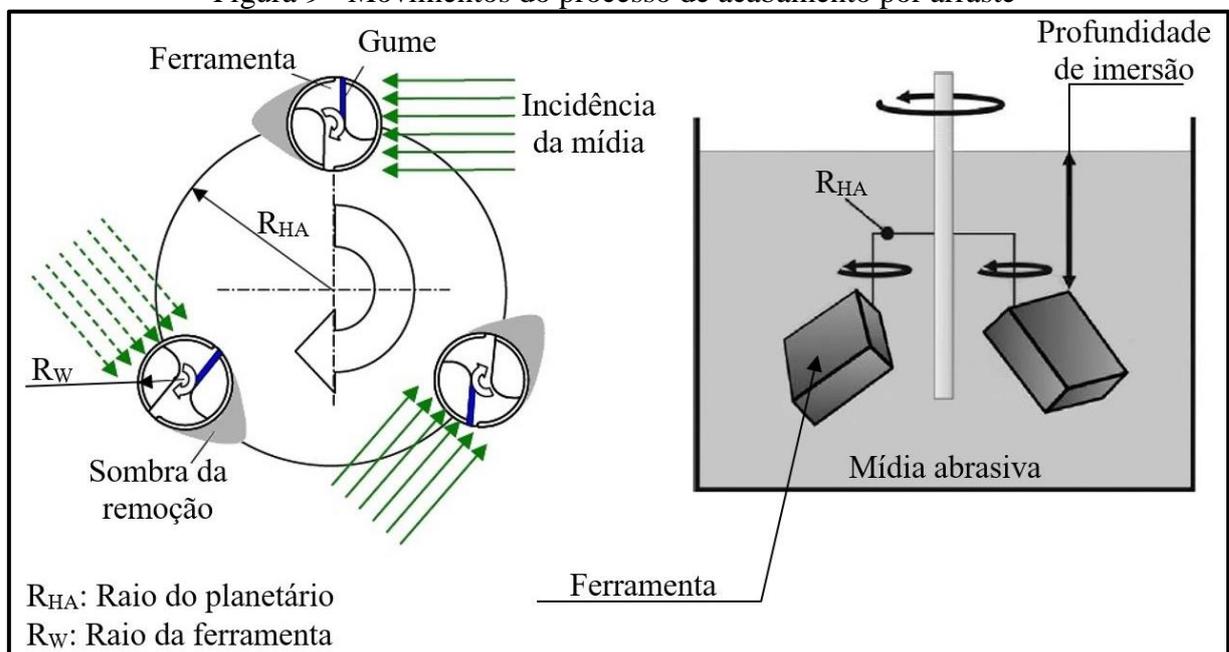
de ferramentas rotativas, como brocas e fresas de topo, cria uma incerteza adicional no que diz respeito à reprodutibilidade do raio do gume. Neste caso, um maior controle do tratamento é exigido (RISSE, 2006). Sabe-se então que, para ferramentas com uma geometria de gume complexa, o acabamento por arraste é muito utilizado e traz parâmetros que possibilitam um maior controle para essa aplicação (ZHAO et al., 2016; HRONEK, ZETEK e BAKŁA, 2017).

### 2.2.2 Acabamento por arraste

Com resultados confiáveis e boa reprodutibilidade, o acabamento por arraste (*drag finishing*) surge como boa alternativa para o tratamento de ferramentas de corte. A forma de aplicação, juntamente com os pequenos grãos abrasivos empregados no método, possibilitam um arredondamento uniforme mesmo em ferramentas com perfis de gume complexos (DENKENA e BIERMANN, 2014; PAUCKSH, 2008; TIKAL, 2009).

O princípio fundamental deste tratamento é a imersão de uma ou mais ferramentas em um meio contendo grãos abrasivos livres. A ferramenta realiza o movimento de rotação em torno do próprio eixo e, simultaneamente, se move em uma órbita planetária (DENKENA e BIERMANN, 2014; PAUCKSH, 2008; TIKAL, 2009). O movimento produz uma pressão entre a mídia abrasiva e a ferramenta, proporcionando a remoção de material no gume (HRONEK, ZETEK e BAKŁA, 2017). A Figura 9 exibe uma representação da cinemática do processo.

Figura 9 - Movimentos do processo de acabamento por arraste



Fonte: Adaptado de Denkena e Biermann (2014) e Risse (2006).

Vários parâmetros definem o tratamento e influenciam nos resultados. Pauscksh (2008) destaca que, em condições constantes, profundidades de imersão maiores causam maiores arredondamentos de gume. Em um estudo, Hronek, Zetek e Bakša (2017) constataram que o tamanho do raio obtido teve aumento de 44% de uma profundidade de imersão inicial de 330 mm para uma profundidade de imersão final de 430 mm.

Além desta variável, velocidade e sentido de rotação, tempo de tratamento e especificações da mídia abrasiva são fatores que atuam diretamente na geração da geometria (DENKENA e BIERMANN, 2014; RISSE, 2006).

Para ferramentas de metal-duro, Tikal (2009) salienta que o tempo de aplicação do tratamento permanece entre 2 e 10 minutos. O autor também ressalta que os tamanhos de raios obtidos no processo são fortemente influenciados pelas mídias abrasivas, onde o tamanho de grão, a dureza e a densidade provocam efeitos significativos.

#### 2.2.2.1 Mídias abrasivas

Mesmo com várias pesquisas sobre o tratamento por arraste, informações relacionadas às propriedades e características das mídias abrasivas ainda são escassas (CARRER, 2018). Em um estudo realizado por Ost (2016), foi possível observar que a composição de uma mídia comercial apresenta basicamente três substâncias: um elemento de granulometria maior e tamanho homogêneo, um aditivo abrasivo, e um ligante de alta viscosidade. O granulado tem função de transportar o abrasivo e atuar como carga na remoção de material (CARRER, 2018).

As mídias comerciais são divididas em várias classes, de acordo com sua composição e aplicação, podendo atuar mais na remoção de material ou na capacidade de geração de uma superfície mais lisa (OTEC, 2019). Entre elas, uma muito utilizada para o tratamento por arraste, inclusive presente no estudo de Carrer (2018), possui referência HSC 1/300, da empresa alemã OTEC. Esta formulação, por exemplo, apresenta carbeto de silício (SiC) e casca de noz em sua composição, com granulometria na faixa entre 0,8 mm e 1,3 mm (OTEC, 2019; TIKAL, 2009; UHLMANN, 2017). A mídia, neste caso, apresenta 30% de SiC e 70% de casca de noz em sua formulação (UHLMANN et al., 2016).

Hronek et al. (2018) constataram que a mídia de referência HSC 1/300 possibilita um tratamento homogêneo, com uma pequena desvantagem para obtenção de raios na faixa de 25 µm. Neste caso, o tempo de tratamento ficou próximo aos 23 minutos. De acordo com as especificações, esta mídia é utilizada principalmente com a função de atuar no acabamento da microgeometria da ferramenta de corte (HRONEK, ZETEK e BAKŁA, 2017).

## 2.3 USINABILIDADE

O termo usinabilidade pode ser descrito como as dificuldades que um material impõe durante a sua usinagem, compreendendo as propriedades influentes no processo. Durante o trabalho com ferramentas de corte, observa-se que os diversos materiais apresentam um comportamento distinto, oferecendo maiores ou menores complicações ao operador (FERRARESI, 1970; KLOCKE, 2017; STEMMER, 2005). As propriedades de usinagem de um metal são aquelas que expressam seu efeito nas grandezas mensuráveis do processo, tais como a força de usinagem, a vida da ferramenta, o acabamento superficial da peça, a temperatura, a produtividade e as características do cavaco (FERRARESI, 1970).

Diferentemente da resistência à tração, a usinabilidade não é uma propriedade de um único material. Ela resulta sempre da combinação entre a ferramenta e a peça usinada (FERRARESI, 1970). Sendo assim, quatro critérios são comumente utilizados para a avaliação adequada desta característica: vida da ferramenta, força de usinagem, qualidade superficial da peça e facilidade na formação dos cavacos (KLOCKE, 2017; STEMMER, 2005).

Na descrição da usinabilidade a simbologia  $Z_v$  e  $Z_s$  é empregada. O índice “v” corresponde ao desgaste, enquanto o índice “s” está relacionado com o cavaco e sua formação. A usinabilidade  $Z_v$  é aceita como boa quando o material pode ser usinado com velocidade de corte elevada e com seção de cavaco grande, e ainda assim resultar em um pequeno desgaste na ferramenta. Já  $Z_s$  trata da observação na formação do cavaco e é tido como bom quando a adesão do material é pequena e não são formados cavacos na forma de fita ou enrolados, além de uma superfície lisa e isenta de rebarbas (KLOCKE, 2017).

### 2.3.1 Vida da ferramenta

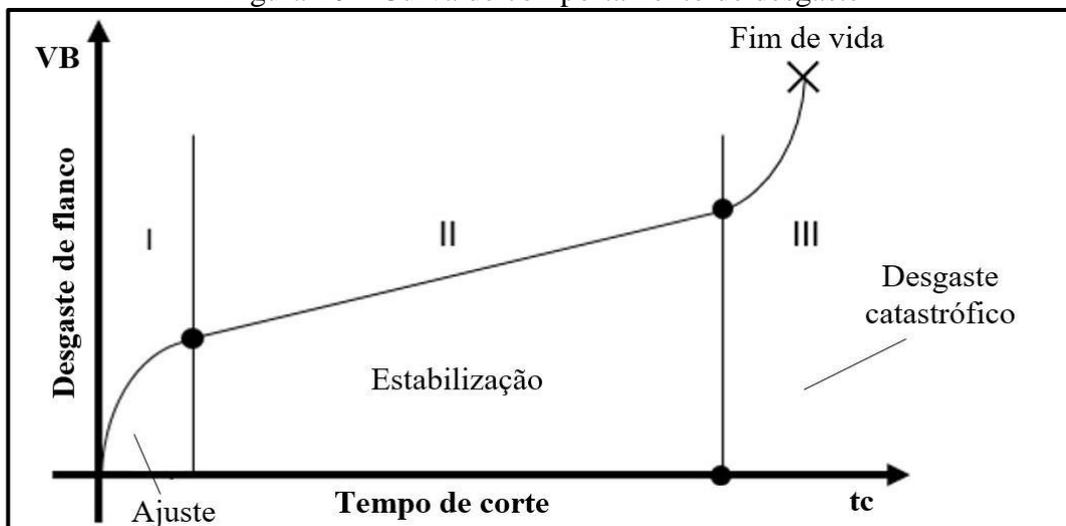
O desgaste está associado à vida da ferramenta, termo este adotado para o tempo em que a mesma trabalha até perder sua capacidade de corte e precisar ser substituída ou reafiada. Assim, um critério deve ser adotado para determinar o fim da vida da ferramenta, mantendo o processo produtivo dentro das condições econômicas adequadas (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999; MACHADO et al., 2009).

Na prática, avaliações qualitativas são comumente adotadas para estabelecer o momento de troca, tais como vibrações (ruídos), formação de rebarbas, forma dos cavacos e outros (STEMMER, 2005). Para avaliações quantitativas, uma das maneiras adotadas como critério de fim de vida é a atribuição de valores para os desgastes  $VB$  e  $VB_{max}$ . Além destes, é

possível determinar a substituição da ferramenta a partir do tempo efetivo de trabalho, do número de peças usinadas e da rugosidade superficial do componente (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999).

Uma série de estudos sobre desgaste em ferramentas de corte possibilitaram a compreensão do seu comportamento ao longo do tempo. A Figura 10 traz uma representação gráfica da relação entre desgaste de flanco e tempo de corte. O comportamento pode ser definido em três estágios, onde o primeiro apresenta um desgaste elevado em um curto período de tempo, proveniente da adequação do gume. Após este período, uma taxa constante de desgaste aparece, com mecanismos definidos, formando o segundo estágio. Finalmente, no terceiro estágio, há um aumento na temperatura e nas tensões envolvidas, provocando um desgaste acelerado e em alguns casos o colapso da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

Figura 10 – Curva de comportamento de desgaste



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

É importante ressaltar que a engenharia envolvida no processo de usinagem deve observar atentamente a evolução da curva de desgaste, evitando que o terceiro estágio já que nele o tempo para ocorrer a quebra de ferramenta é muito curto (MACHADO et al., 2009).

### 2.3.1.1 Mecanismos e tipos de desgaste na usinagem

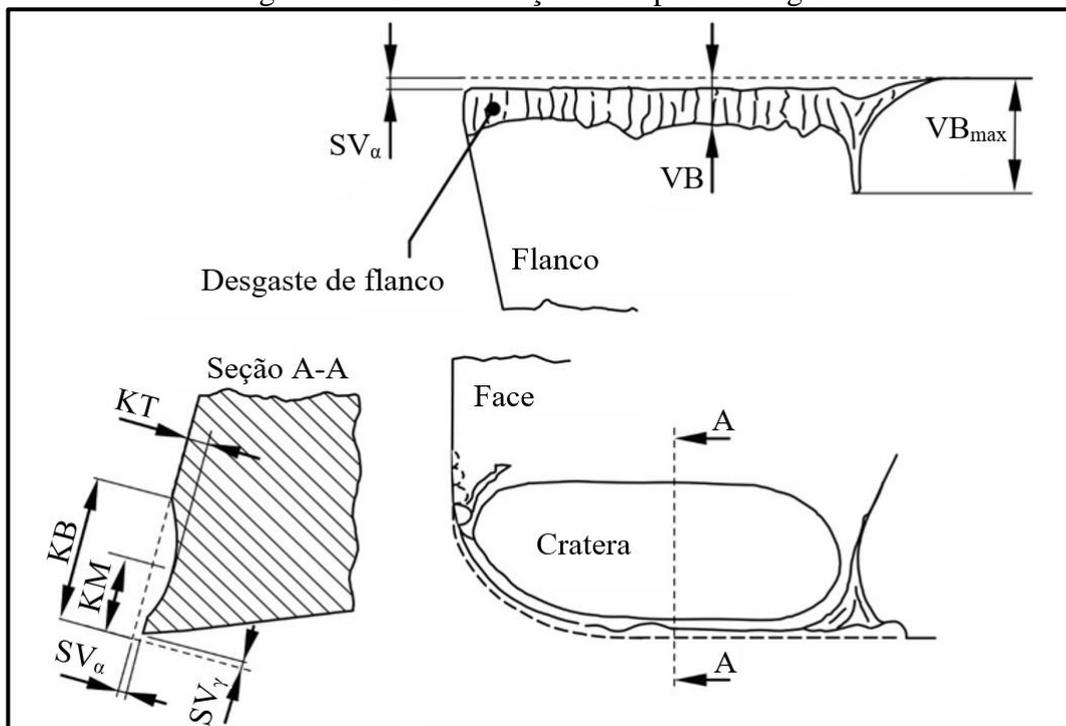
A dificuldade de usinagem imposta pelo material leva a ferramenta a condições de corte severas, com cargas compressivas complexas, altas velocidades de corte e elevadas temperaturas. Tais condições submetem a região do gume a deformações e atrito elevado, provocando uma perda progressiva de material na superfície da ferramenta até que a mesma

alcance seu fim de vida (KLOCKE, 2017). Segundo Stemmer (2005), a falha pode ocorrer sob formas distintas como lascamento do gume, desgaste no flanco e desgaste na face.

O lascamento pode ser tratado como uma remoção súbita de grandes partículas do gume, ocorrendo principalmente em ferramentas com materiais frágeis, acarretando em piores resultados na qualidade superficial da peça e até mesmo a quebra da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999). Já o desgaste de flanco, também conhecido como marca de desgaste, é a faixa desgastada na região de flanco. Ele surge pela remoção contínua de pequenas partículas da ferramenta e é responsável por modificar a forma do gume, prejudicando o acabamento superficial e podendo causar mudanças dimensionais na peça (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999). E o desgaste na face, denominado cratera, é a concavidade formada na superfície de saída devido ao atrito com o cavaco. Seu crescimento pode provocar a quebra da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999; STEMMER, 2005).

As grandezas mensuráveis de desgaste estão representadas na Figura 11. Entre elas destacam-se o valor médio de desgaste de flanco ( $VB$ ), e seu valor máximo ( $VB_{max}$ ). Aparecem ainda o deslocamento do gume em relação ao flanco ( $SV_{\alpha}$ ) e em relação à face ( $SV_{\gamma}$ ) da ferramenta, a profundidade ( $KT$ ), largura ( $KB$ ) e o afastamento ( $KM$ ) da cratera (KLOCKE, 2017; DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999; STEMMER, 2005).

Figura 11 - Caracterização dos tipos de desgaste



Fonte: Adaptado de Klocke (2017).

As características particulares do fresamento intensificam o desgaste da ferramenta. Por se tratar de um processo com corte interrompido, há uma variação cíclica de cargas térmicas e mecânicas que podem acarretar no surgimento de trincas térmicas e trincas por fadiga (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999).

As avarias citadas apresentam como agentes alguns fatores inseridos no processo. Entre eles, é possível destacar a adesão, a oxidação, a difusão, e a abrasão como os principais mecanismos de desgaste em ferramentas de corte (KLOCKE, 2017; STEMMER, 2005).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999), a adesão entre o material da peça e a ferramenta ocorre quando há entre eles um contato sob cargas moderadas, com baixas velocidades de corte e baixas temperaturas. O mecanismo de desgaste é impulsionado já que a superfície inferior do cavaco recém arrancado se apresenta sem nenhuma camada protetora de óxidos, ou seja, muito ativa quimicamente (STEMMER, 2005). Algumas partículas de material se soldam na face da ferramenta, adquirindo um estado encruado e provocando o aparecimento do gume postiço. Este efeito pode ser minimizado com a aplicação de um fluido com ação principalmente lubrificante ou através de um recobrimento adequado da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999; STEMMER, 2005).

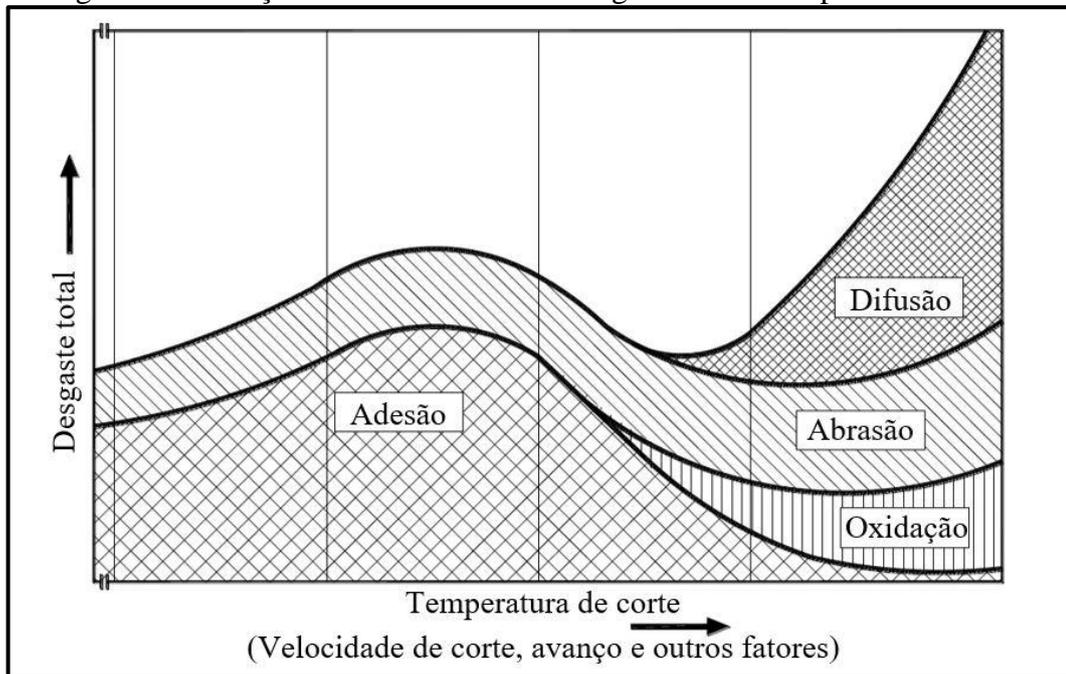
De forma oposta à adesão, os mecanismos de oxidação e difusão são gerados através de altas temperaturas. A oxidação necessita da presença de ar e água (existente nos fluidos lubrificantes), e o desgaste gerado pela mesma surge nas extremidades de contato entre o cavaco e a ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999). Na difusão, além das altas temperaturas necessárias para que as moléculas adquiram certa mobilidade, a duração de contato e a afinidade físico-química dos metais envolvidos no corte provocam a transferência de átomos de um material para outro (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999; KLOCKE, 2017; STEMMER, 2005).

Entretanto, é a abrasão ganha relevância já que pode gerar tanto um desgaste de flanco quanto de cratera (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999). O escorregamento entre a ferramenta e a peça, sob altas pressões e temperaturas, é responsável pelo arrancamento de finas partículas do material da ferramenta. O efeito é aumentado a partir da presença de inclusões e partículas duras no material (STEMMER, 2005).

Porém, mesmo com a definição clara dos mecanismos, é praticamente impossível avaliar a contribuição quantitativa de cada um para a formação do desgaste, visto que todos eles agem simultaneamente. De forma qualitativa, é possível identificar a relação entre a velocidade de corte e surgimento dos mecanismos de desgaste. Assim, em velocidades de cortes baixas o desgaste é causado principalmente pela aderência, enquanto a abrasão, oxidação e difusão

surtem em velocidades de corte maiores, como pode ser observado na Figura 12 (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999; KLOCKE, 2017).

Figura 12 - Relação dos mecanismos de desgaste com a temperatura de corte



Fonte: Adaptado de Klocke (2017).

### 2.3.2 Qualidade superficial

A superfície é decisiva para a funcionalidade e durabilidade de componentes gerados a partir de processos de corte (TOENSHOFF e DENKENA, 2013). Elas são tratadas como entidades que podem possuir propriedades diferentes do restante do material da peça, principalmente nos metais, em função de camadas de óxido, camadas endurecidas pelo trabalho e várias outras características. Uma série de defeitos podem coexistir neste local, dependendo da maneira como a superfície foi gerada, sendo que os mesmos podem afetar negativamente a integridade superficial das peças (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

Klocke (2017) destaca que a qualidade superficial obtida na usinagem pode ser um fator determinante para a escolha de parâmetros iniciais do processo, como geometria da ferramenta e condições de corte. As grandezas influentes sobre a qualidade superficial na usinagem de materiais metálicos estão representadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Grandezas influentes sobre a qualidade superficial na usinagem

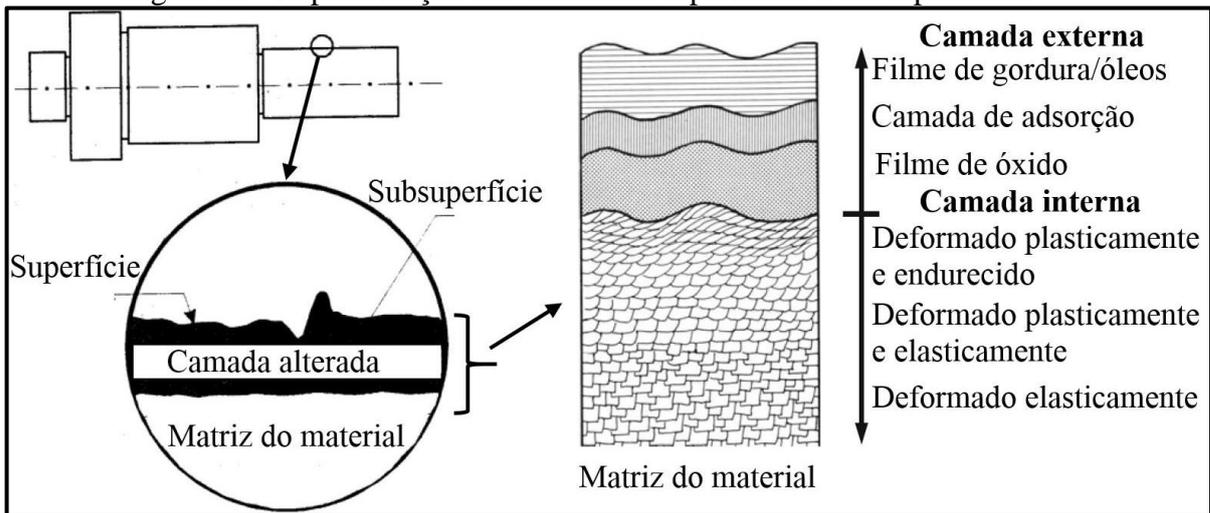
Grandezas influentes sobre a qualidade superficial na usinagem de metais				
Rugosidade cinemática		Rugosidade da superfície de corte		Outras influências
Movimento rotativo do gume da ferramenta	Perfil do gume de corte	Mec. de corte e deformação no gume de corte; zona de retenção de gume postigo	Alteração da superfície de corte	Vibrações, cavaco em contato com a peça, deformação dos mecanismos de avanço
Influenciado por:	Influenciado por:	Influenciado por:	Influenciado por:	Influenciado por:
Avanço	Desgaste no gume secundário	Geometria de corte ativa $\alpha$ , $\gamma$ e $\lambda$	Desgaste na quina e superfície livre	Rapidez de sistemas dinâmicos: ferramenta-máquina-peça
Velocidade de corte	Entalhes	Tipo, estrutura e resistência do material da peça	Relação entre atrito e desgaste	Força de corte
				Formação do cavaco
	Abrasão	Temp. de corte	Fluido refrigerante	Estrutura interm. do gume
		Mat. de corte		Material da peça
				Condições de corte

Fonte: Adaptado de Klocke (2017).

As modificações superficiais são produzidas principalmente por cargas mecânicas e térmicas, comuns no fresamento, e que podem provocar uma redução no tempo de vida da peça (TOENSHOFF e DENKENA, 2013). A superfície final de um componente usinado é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, vibrações, calor, tensões residuais e até, em algumas vezes, reações químicas. Todos esses fatores podem apresentar efeitos diferentes na nova superfície (MACHADO et al., 2009).

Vale destacar que a qualidade superficial inclui elementos da superfície e da subsuperfície. Para a primeira, efeitos externos como textura e rugosidade estão compreendidos, abrangendo falhas, trincas e ondulações. Já a subsuperfície vai além do que pode ser observado externamente na peça. Ela abrange transformações microestruturais, deformações plásticas, alterações de dureza, tensões residuais, micro-trincas e até mesmo variações na composição química (OLIVEIRA, 2006). A determinação das propriedades superficiais é frequentemente obtida através de métodos táteis e ópticos, enquanto que as subsuperficiais são encontradas a partir de seções polidas do material (TOENSHOFF e DENKENA, 2013). A Figura 13 apresenta os elementos formadores da qualidade superficial.

Figura 13 - Representação dos elementos superficiais e subsuperficiais

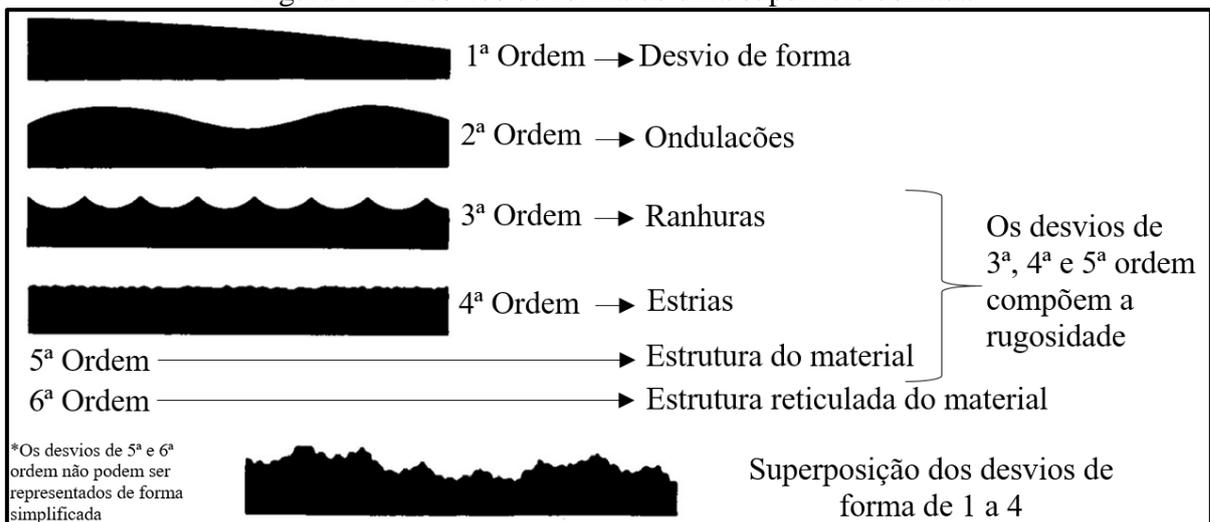


Fonte: Adaptado de Oliveira (2006) e Klocke (2017).

### 2.3.2.1 Textura

Os desvios randômicos e repetitivos da superfície real em relação à superfície geométrica são elementos formadores da textura. A superfície usinada é composta de muitos destes elementos, gerados durante o processo de fabricação. Os sulcos produzidos indicam a direção predominante das marcas deixadas pela ferramenta sobre a superfície da peça. Isso faz com que processos de fabricação como torneamento, fresamento e retificação deixem marcas características bem definidas e alinhadas (BET, 1999). A Figura 14 traz uma representação esquemática de um perfil usinado. O desvio total entre a superfície real e a superfície ideal de projeto é definido em seis ordens, desde desvios grosseiros até desvios finos (KLOCKE, 2017).

Figura 14 - Desvios de forma de uma superfície usinada



Fonte: Adaptado de Klocke (2017).

Vale destacar que desvios de forma causados pela deformação do componente ou erros de retilinearidade nas guias das máquinas que os produziram não são compreendidos para a avaliação da textura, ou seja, são utilizados desvios de 2ª à 5ª ordem (BET, 1999).

### 2.3.2.2 Rugosidade

A rugosidade pode ser definida como o conjunto de irregularidades oriundas do processo de fabricação, formada por pequenas saliências e reentrâncias na topografia da superfície (NICOLA, 2008). Sua avaliação normalmente é feita através da utilização de um apalpador mecânico percorrendo uma superfície de amostragem, chamada de *cut-off*, e registrando os valores obtidos (BET, 1999; NICOLA, 2008; KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

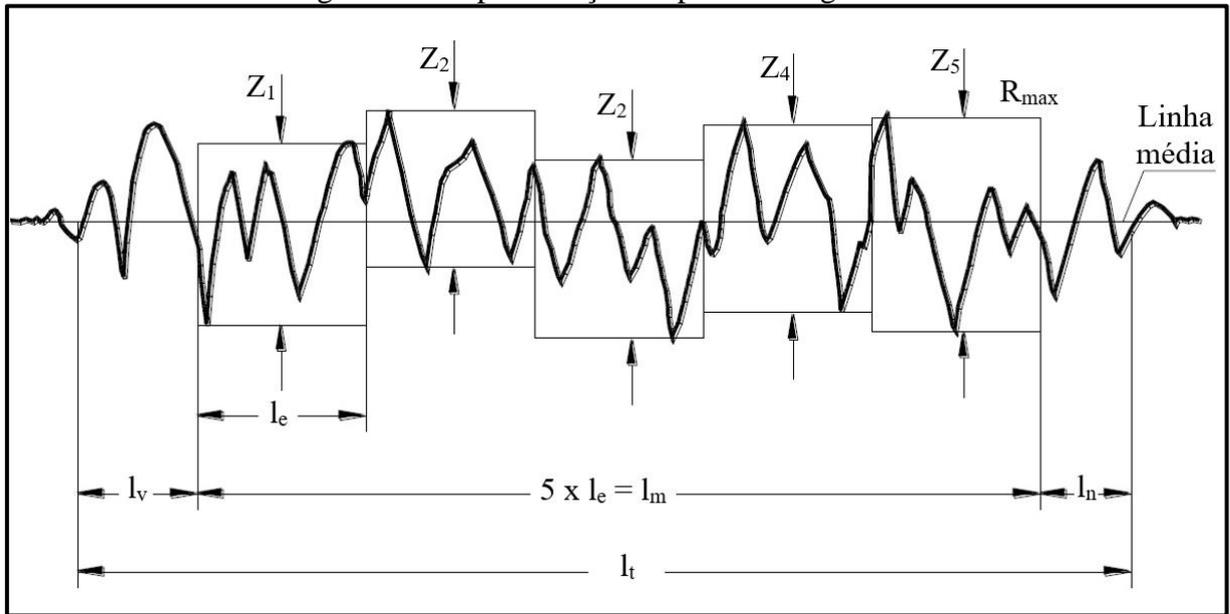
Os parâmetros de rugosidade são definidos em relação a uma linha média, imaginária, no comprimento do *cut-off*. Ela é posicionada de modo que haja uma igualdade entre as áreas do perfil que estão acima e abaixo da mesma (OLIVEIRA, 2006). Os principais critérios para a avaliação da rugosidade podem ser agrupados em três classes:  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{max}$ .

A rugosidade média ( $R_a$ ) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento total de medição ( $l_m$ ) (OST, 2016). Ela pode quantificar alterações graduais da superfície geradas pelo desgaste da ferramenta, porém, não permite diferenciação entre picos e ranhuras (TOENSHOFF e DENKENA, 2013).

Enquanto isso, o parâmetro  $R_z$  corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ), sendo a soma dos valores absolutos dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem. Já o parâmetro  $R_y$ , ou  $R_{max}$ , é a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo em um comprimento de medição unitário ( $l_e$ ), representado no último comprimento unitário da Figura 15 (OST, 2016). As duas características,  $R_z$  e  $R_{max}$ , são frequentemente utilizadas em conjunto. Neste caso, se o valor de  $R_{max}$  for amplamente maior do que  $R_z$ , significa que a amostragem avaliada contém um único pico especialmente alto e que uma medição em outro local pode ser necessária para obtenção de valores mais precisos (TOENSHOFF e DENKENA, 2013).

Além destes, os parâmetros  $R_p$  e  $R_v$ , respectivamente o maior pico e o maior vale em uma medição e  $R_q$ , um valor quadrático médio do perfil, também se destacam (OST, 2016).

Figura 15 - Representação do perfil de rugosidade



Fonte: Adaptado de Klocke (2017).

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo mostra a metodologia adotada para a realização dos ensaios, que possuem a finalidade de estabelecer uma comparação entre as mídias comercial e alternativa. Há uma descrição dos procedimentos adotados, dos elementos variáveis em estudo e suas respectivas saídas. O capítulo conta ainda com a apresentação dos parâmetros de corte, bem como materiais, ferramentas e equipamentos utilizados na execução dos testes.

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O estudo realizado por Carrer (2018) surgiu com o intuito de gerar uma primeira versão de mídia alternativa, com materiais de fácil obtenção, e que pudessem reproduzir os resultados de forma tão satisfatória quanto aqueles que podem ser obtidos comercialmente. Entre as formulações propostas pela autora, a mídia composta por zirconita ( $ZrSiO_4$ ) como material abrasivo, casca de amendoim, e um óleo, apresentou os melhores resultados.

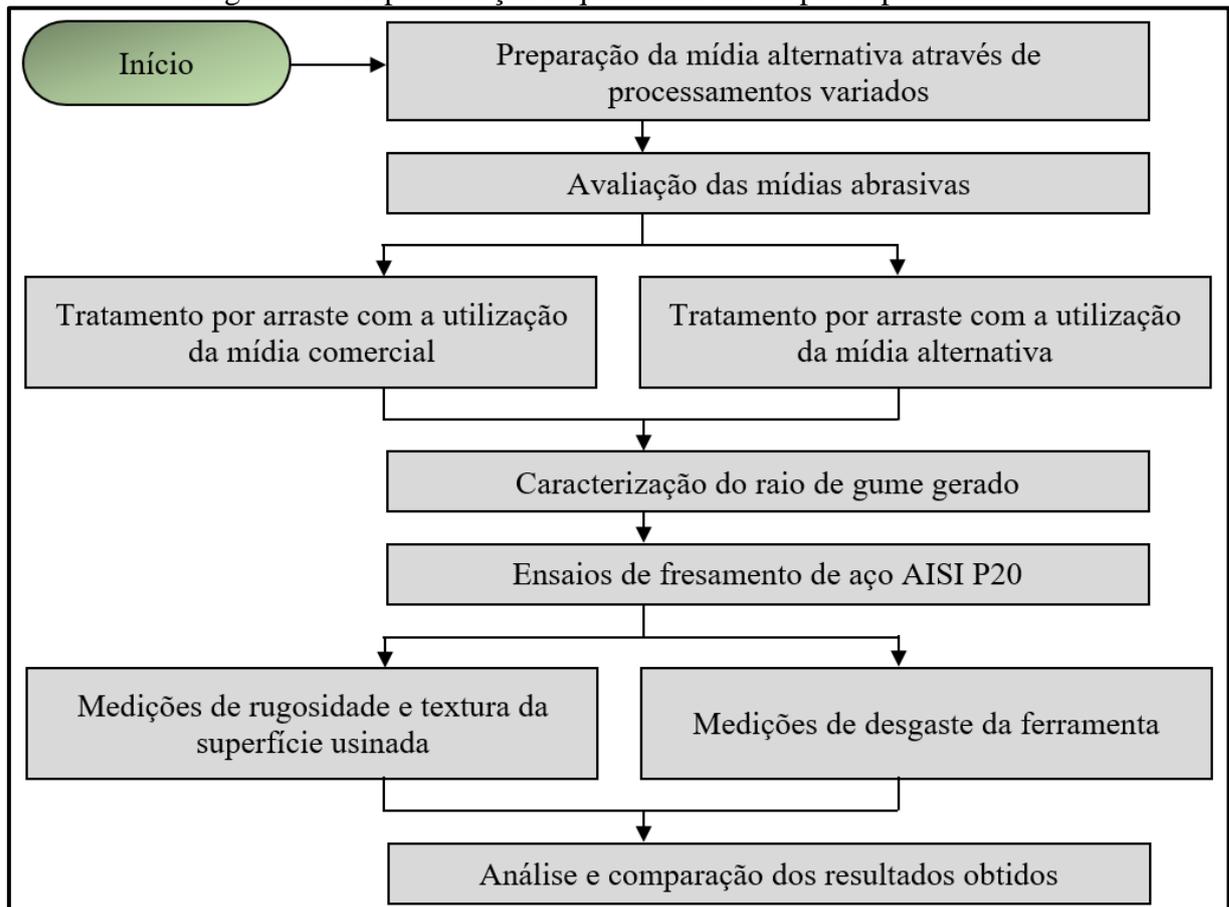
Aqui, o estudo teve como preceito básico a busca por um processamento mais refinado na granulometria da casca de amendoim (CA). Assim, utilizando o know-how adquirido com o trabalho de Carrer (2018), buscou-se uma mistura mais homogênea para a mídia alternativa. A sequência do trabalho contou com a preparação da mídia através de um controle na granulometria do material que atua como carga (CA). Os elementos granulados foram peneirados em peneiras granulométricas, mantendo uma faixa controlada de tamanho de grão, e seguindo, posteriormente, para a mistura com o material abrasivo e óleo.

A etapa subsequente envolveu o tratamento de acabamento por arraste das fresas de topo, seguindo os parâmetros descritos no item 3.2. As ferramentas tratadas foram avaliadas antes e depois do tratamento, de forma qualitativa, visando a identificação de possíveis irregularidades, micro-lascamentos e atenuações de linhas de afiação.

Após a completa caracterização das fresas de topo, os ensaios de fresamento de aço P20 foram conduzidos até que um critério de fim de vida para as ferramentas fosse atingido.

Avaliações de rugosidade e textura foram feitas nos corpos de prova, enquanto que as ferramentas passaram por medições de desgaste durante os testes. Os resultados extraídos puderam ser utilizados na geração de gráficos e comparações com estudos anteriores. Uma representação esquemática dos ensaios experimentais pode ser observada na Figura 16.

Figura 16 - Representação esquemática das etapas experimentais



Fonte: O autor (2019).

O planejamento deste trabalho apresentou como proposta variações no processamento da mídia, buscando melhorias nos resultados. Para uma comparação coesa, as condições de corte permaneceram iguais para todo o ensaio.

### 3.2 TRATAMENTO DAS FERRAMENTAS

O experimento teve como preceito básico avaliar o desempenho de fresas de topo tratadas pelo método de acabamento por arraste. Em parceria com a empresa Secta Tools, as fresas de topo, utilizadas em estudos anteriores, passaram pelo processo de reafiação. O processo gerou a reconstituição dos gumes, deixando-os com o formato original.

A partir disso, as ferramentas foram submetidas ao tratamento por arraste com a mídia alternativa, realizado dentro da própria Universidade. A fim de garantir a possibilidade de comparação com estudos anteriores, como Ost (2016) e Carrer (2018), e, simulando o processo comercial, o tratamento por arraste teve duração total de 10 minutos. Nele, a ferramenta teve rotação constante de 80 rpm, em sentido horário.

### 3.2.1 Dados fixos de entrada

A primeira condição de igualdade foi referente aos parâmetros de corte, já que estes possuem uma grande influência nos resultados da usinagem e na vida da ferramenta. Deste modo, os parâmetros adotados foram constantes durante o ensaio, garantindo a confiabilidade do estudo. Assim, a velocidade de corte ( $v_c$ ) e o avanço por gume ( $f_z$ ) serão de 180 m/min e 0,06 mm/gume, respectivamente. É importante destacar que os parâmetros adotados são consolidados na literatura, adequados para as especificações da ferramenta e possibilitaram a comparação com estudos anteriores.

O fresamento de topo reto foi conduzido sem a presença de fluido lubrificante. Tal decisão impediu que variáveis oriundas da lubrificação fossem inseridas no teste. Estas condições permitiram que os resultados observados no ensaio pudessem ser comparados com o estudo realizado por Carrer (2018). Outro ponto importante foi a definição do método de fresamento. A estratégia adotada foi o movimento concordante, ou seja, a rotação da ferramenta e o avanço da peça com o mesmo sentido.

Ainda, vale ressaltar que os ensaios ocorreram com passes de 252 mm de comprimento, profundidade de corte axial ( $a_p$ ) de 0,5 mm, e profundidade de corte radial ( $a_e$ ) de 0,2 mm, todos eles executados no mesmo material como corpo de prova.

### 3.2.2 Variáveis de entrada

As variações na entrada do ensaio ficaram por conta das mídias abrasivas utilizadas no tratamento das fresas de topo. Os estudos foram conduzidos com ferramentas tratadas pela mídia proposta e os resultados foram comparados com os resultados de fresas de topo reafiadas e sem nenhum tipo de tratamento, com fresas de topo tratadas por uma mídia abrasiva comercial da empresa alemã OTEC, de referência HSC 1/300 e também com ferramentas tratadas com esta mesma mídia, numa primeira versão de sua produção.

A mídia alternativa teve zirconita ( $ZrSiO_4$ ) como material abrasivo, casca de amendoim como elemento granulado, e um óleo, responsável pela união dos elementos. O elemento atuante como carga (CA) teve uma faixa de granulometria controlada que se equipara com a que é encontrada na composição comercial. A Tabela 1 apresenta, para cada condição de tratamento que foram submetidas, as ferramentas presentes no trabalho, ilustrando ainda as variáveis de saída, abordadas no item 3.2.3.

Tabela 1 - Condições de tratamento para as ferramentas

Ferramenta	Condição de tratamento		Mídia abrasiva			Medições	
	Reafiada e sem tratamento de gume	Reafiada e com tratamento de gume	Comercial HSC 1/300	Primeira proposta (ZrSiO <sub>4</sub> + CA + óleo)	Proposta atual (ZrSiO <sub>4</sub> + CA + óleo)	Qualidade Superficial	Desgaste da ferramenta
REF	X					Comparação	
B11	X					Comparação	
A7		X	X			Comparação	
B4		X	X			Comparação	
B7		X		X		Comparação	
B8		X		X		Comparação	
B5		X			X	X	X
B13		X			X	X	X

Fonte: O Autor (2019).

### 3.2.3 Variáveis de saída

Os elementos variáveis que foram comparados ao final dos testes práticos estão atrelados às características do corpo de prova usinado e da ferramenta de corte. Para a peça, rugosidade e textura foram analisadas de forma qualitativa e quantitativa, e, para a ferramenta, o desgaste da mesma (Tabela 1).

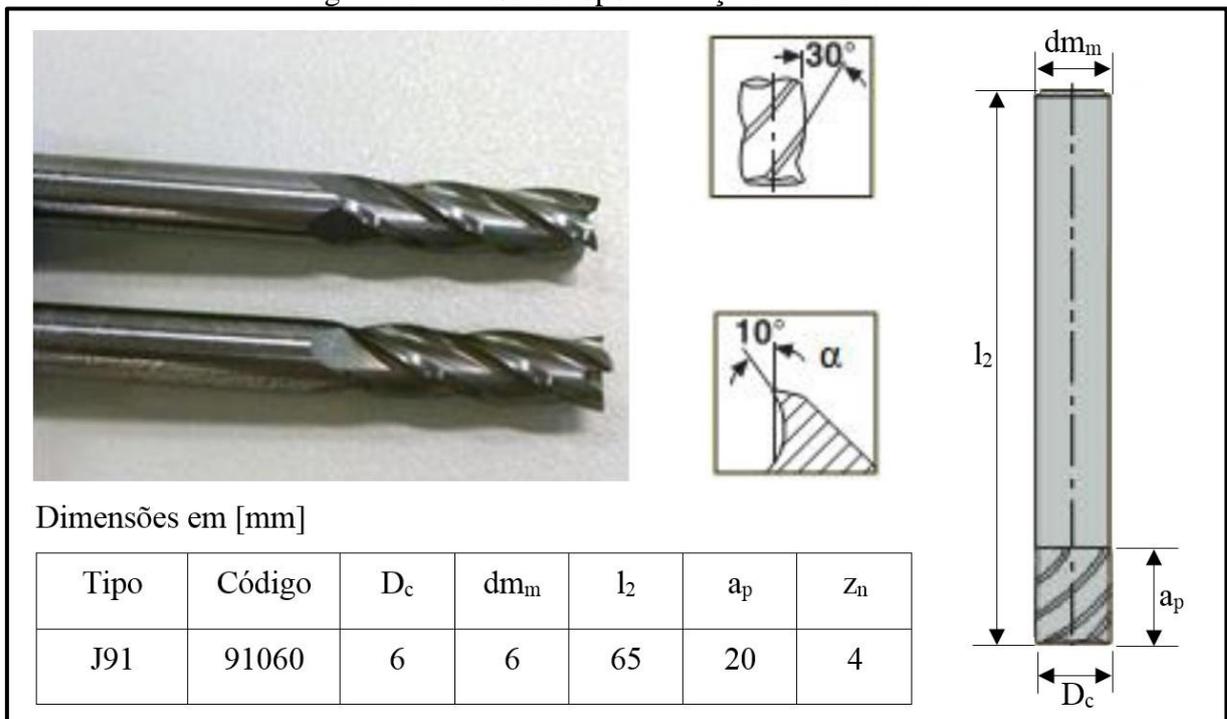
A rugosidade foi avaliada com base nos critérios  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{max}$ , mensurados no início e no fim de vida. Todas as medições partiram da utilização de um *cut-off* de 0,8 mm de comprimento, tendo entre 4 e 6 medições por região usinada. Vale destacar que essas medições ocorreram em um intervalo de 30 mm de comprimento, sendo responsáveis pela geração da incerteza dos valores de rugosidade. Foi necessário ainda determinar um critério de parada para os testes, como forma de avaliação do critério de fim de vida. Dentro desta necessidade, os fresamentos foram conduzidos até o momento em que uma das seguintes condições fossem

satisfeitas: desgaste de flanco máximo ( $VB_{\max}$ ) de 0,2 mm ou lascamento da ferramenta.

### 3.2.4 Ferramentas

A usinagem contou com fresas de metal-duro, inteiriças, com diâmetro de 6 mm e quatro gumes. As mesmas foram utilizadas sem nenhum tipo de revestimento, tampouco raio de quina. Elas foram fornecidas pelo fabricante Seco Tools, com referência 91060, da linha Jabro, com afiação original. Outros detalhes podem ser observados na Figura 17.

Figura 17 – Fresa de topo inteiriça de metal-duro



Fonte: Adaptado de Ost (2016)

### 3.2.5 Equipamentos

A execução dos testes práticos foi realizada no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção (LNTP), localizado no bloco D da cidade universitária da UCS. O tratamento das ferramentas e os ensaios de fresamento contaram com um centro de usinagem LG-500, da marca Hartford, com rotação e potência máxima de 10.000 rpm e 10 kW, respectivamente.

Para as medições de rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil, modelo SJ-301, da marca Mitutoyo. O equipamento possui resolução de 0,01  $\mu\text{m}$ , apalpador de diamante de 90° e raio de ponta de 5  $\mu\text{m}$ . A obtenção da textura foi feita através do uso de um estereoscópio

trinocular de medição universal da marca Entex, modelo TNE-10B e a captura das imagens contou com um microscópio óptico, da Nikon, modelo Epiphot 200. Este último, utilizado também para a obtenção das imagens da ferramenta, antes e após o tratamento por arraste.

### **3.2.6 Material e corpo de prova**

O corpo de prova para o ensaio é constituído de aço AISI P20, com dureza média de 38 HRc, muito empregado na fabricação de moldes e matrizes para injeção de plásticos. O bloco foi preparado com dimensões de 252 mm x 80 mm x 60 mm, com faces retificadas a fim de garantir um melhor posicionamento e planicidade na fixação durante a usinagem.

As amostras para medição de rugosidade e textura foram coletadas em duas etapas diferentes: no início da usinagem e no fim de vida da ferramenta.

## 4 RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados os resultados encontrados nos ensaios de fresamento a partir do tratamento de acabamento por arraste nas ferramentas. A abordagem conta com informações relativas à obtenção da mídia abrasiva alternativa. Na sequência, os resultados dos ensaios de fresamento serão mostrados, discutidos e comparados com ensaios de trabalhos anteriores, analisando a influência do tratamento de gume por arraste sobre a vida da ferramenta e sobre a qualidade superficial da peça.

### 4.1 OBTENÇÃO DAS MÍDIAS

A mídia alternativa proposta no estudo passou por uma preparação visando um controle rigoroso na granulometria do elemento CA, e uma homogeneidade na mistura entre granulado e abrasivo. Contando com alguns pré-testes e também com o *know-how* adquirido em trabalhos anteriores, como Carrer (2018), a mídia foi preparada em parceria com o Grupo de Usinagem da Universidade de Caxias do Sul.

A casca de amendoim foi peneirada em laboratório com a finalidade de manter uma faixa de granulometria próxima à encontrada na mídia comercial utilizada para comparação e as quantidades de cada material não são citadas neste trabalho. A sequência da preparação contou primeiramente com a mistura entre o granulado e o óleo, através de um agitador mecânico, durante 10 minutos. Posteriormente, houve a adição gradativa do material abrasivo, em duas etapas, totalizando mais 10 minutos de mistura.

Após algumas tentativas, percebeu-se que a maior dificuldade ocorre durante o processo de mistura do óleo, responsável pela união entre granulado e abrasivo. Neste caso, uma quantidade de óleo insuficiente impede que toda a casca de amendoim presente na mistura seja envolvida pelo abrasivo, deixando os elementos separados na formulação. Por outro lado, uma quantidade de óleo acima da recomendada torna a mistura pastosa, produzindo uma mídia ineficiente no tratamento já que isso impede a mesma de fluir pelos gumes da ferramenta. Na melhor versão da mídia preparada para este estudo, o óleo foi sendo depositado em gotas, gradativamente, procurando envolver a maior quantidade possível de material granulado.

### 4.2 TRATAMENTO DAS FERRAMENTAS

O tratamento das ferramentas seguiu os parâmetros descritos no item 3.5.1, mantendo

as condições constantes para todas as ferramentas. A Tabela 2 apresenta a relação entre as ferramentas e os tratamentos aplicados.

Tabela 2 - Ferramentas utilizadas nos ensaios

Fresa	Tratamento	Medições
B5	Mídia Alternativa: ZrSiO <sub>4</sub> + CA + óleo	Desgaste, rugosidade e textura
B13	Mídia Alternativa: ZrSiO <sub>4</sub> + CA + óleo	Desgaste, rugosidade e textura

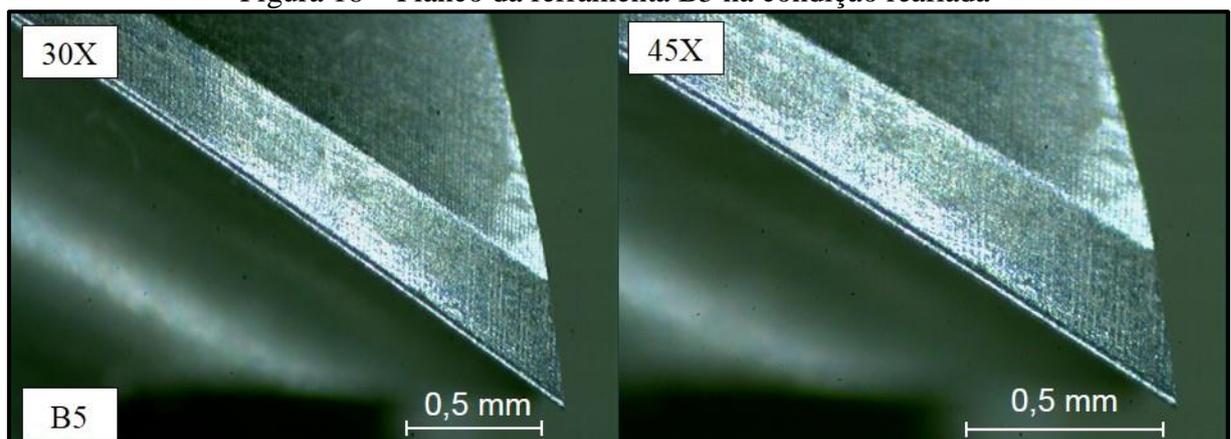
Fonte: O autor (2019).

#### 4.2.1 Caracterização das ferramentas

As fresas de topo, ainda na condição de reafiadas, foram observadas em um microscópio óptico com ampliações de 30 e 45 vezes. A observação de todos os gumes procurou garantir que as ferramentas estivessem livres de qualquer irregularidade do processo de reafiação, como pequenos lascamentos ou trincas nesta região, fazendo com que as modificações provenientes do tratamento por arraste pudessem ser observadas.

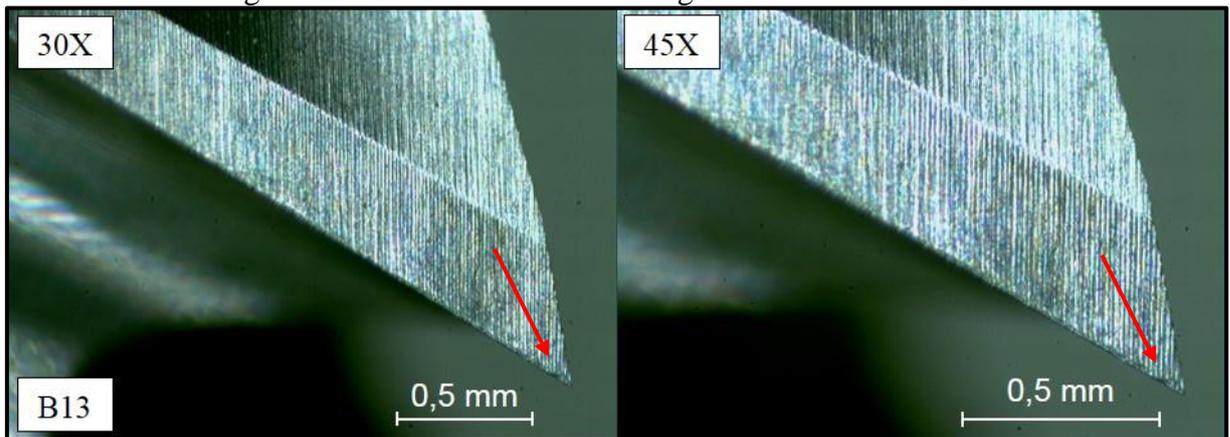
A Figura 18 ilustra as características das ferramentas antes do tratamento. Para ambas, foi possível observar uma superfície livre de imperfeições na região do gume. Os mesmos apresentaram total integridade e marcas bem visíveis do processo de reafiação. Uma única ressalva para um dos gumes da fresa B13 que apresentou lascamento na quina é apresentado na Figura 19. Desta maneira, as fresas de topo foram submetidas ao tratamento de acabamento por arraste e os resultados são demonstrados na sequência do trabalho.

Figura 18 – Flanco da ferramenta B5 na condição reafiada



Fonte: O Autor (2019).

Figura 19 – Lascamento de um dos gumes da ferramenta B13

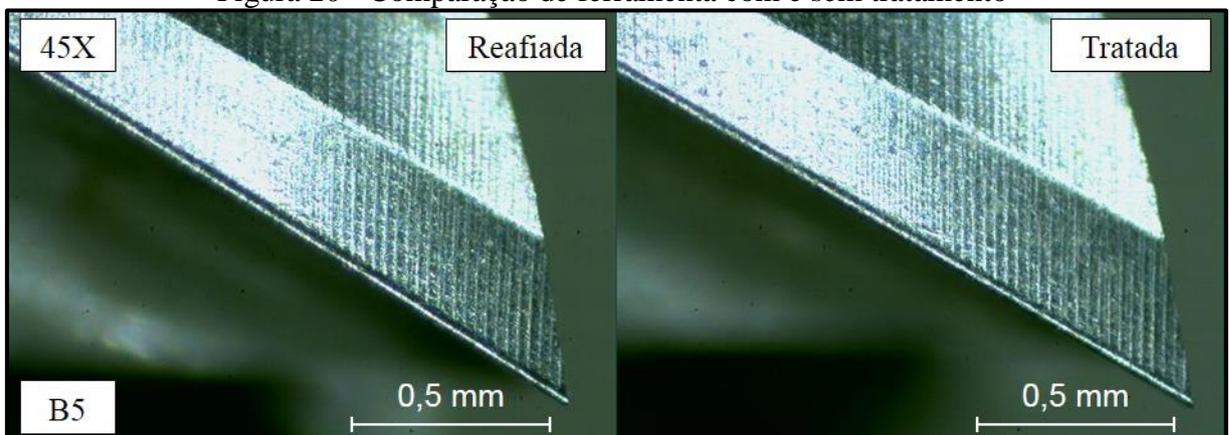


Fonte: O Autor (2019).

De posse das ferramentas tratadas foi possível analisar as fresas de topo, de forma qualitativa, através de ampliações de 25, 30 e 45 vezes. Para as fresas de topo com o tratamento, não houveram evidências de trincas ou imperfeições provenientes do tratamento por arraste, como pode ser observado na Figura 20.

Notou-se um tratamento bastante moderado, sem remoção das marcas de afiação e com modificações pouco perceptíveis para a região de flanco da ferramenta através das ampliações utilizadas. A área afetada ficou nas proximidades da quina, região esta que esteve justamente em uma profundidade de imersão maior durante o tratamento.

Figura 20 - Comparação de ferramenta com e sem tratamento



Fonte: O Autor (2019).

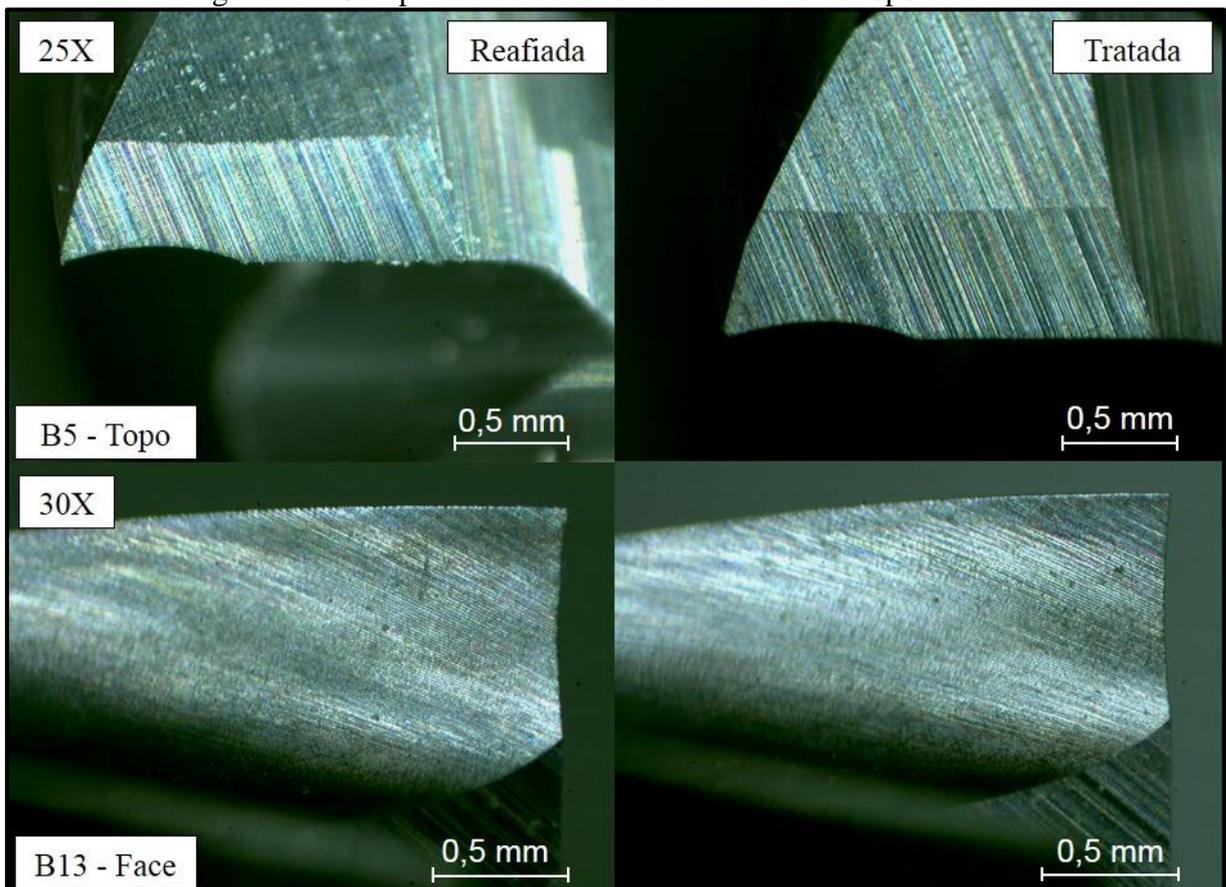
O efeito pôde ser comprovado a partir de uma ampliação no topo da ferramenta. A região do gume secundário apresentou remoção da aresta viva e a quina, por sua vez, apresentou um arredondamento na comparação com a ferramenta apenas na condição de reafiada.

Os efeitos também ficaram visíveis através da observação a partir da face. Ali, o

tratamento proporcionou melhorias na superfície localizada nas proximidades da quina, com uma homogeneidade acentuada. Essas características são apresentadas na Figura 21.

A comparação entre as imagens extraídas do flanco e da face das fresas de topo sugere um arredondamento voltado para a face da ferramenta, ainda que não tenha sido possível realizar as medições dos raios produzidos. Para este caso, os movimentos horários aplicados para a ferramenta e para o eixo árvore durante o tratamento facilitaram o surgimento dessa característica.

Figura 21 - Comparativo do efeito do tratamento no topo e na face



Fonte: O Autor (2019).

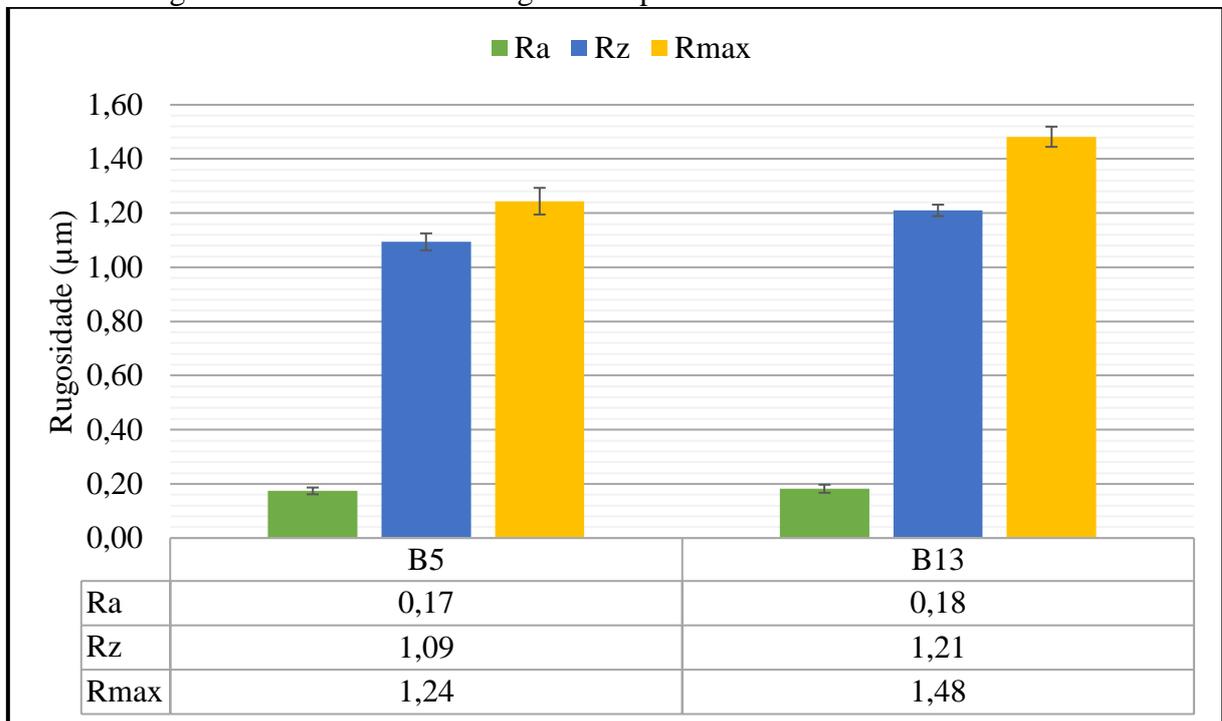
#### 4.3 RUGOSIDADE E TEXTURA DO AÇO P20

Avaliações de rugosidade e textura foram realizadas de forma simultânea no corpo de prova. As medições se concentraram no início e no final da vida das ferramentas em análise, sendo que esta última teve como critério um desgaste de 0,2 mm para  $VB_{max}$ . Os parâmetros  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  e a textura foram avaliados de acordo com as especificações descritas no capítulo 3 deste trabalho.

As Figuras 22 e 23 comparam os resultados obtidos para as duas ferramentas do teste. Observou-se uma rugosidade maior no início da usinagem para ambas no parâmetro  $R_z$ , como era esperado, indicando uma variação maior de picos e vales e indo de encontro ao que é encontrado na literatura. Neste momento ocorre o ajuste do gume e os valores possuem a tendência de ser maiores.

Os valores de  $R_a$  permaneceram estáveis entre o início e o final do teste, algo bastante desejável em um processo de usinagem já que facilita o controle do acabamento superficial. Ainda, na comparação com a primeira versão desta mesma mídia alternativa, proposta por Carrer (2018), os parâmetros  $R_z$  e  $R_{max}$  apresentaram valores menores para o início e para o fim de vida.

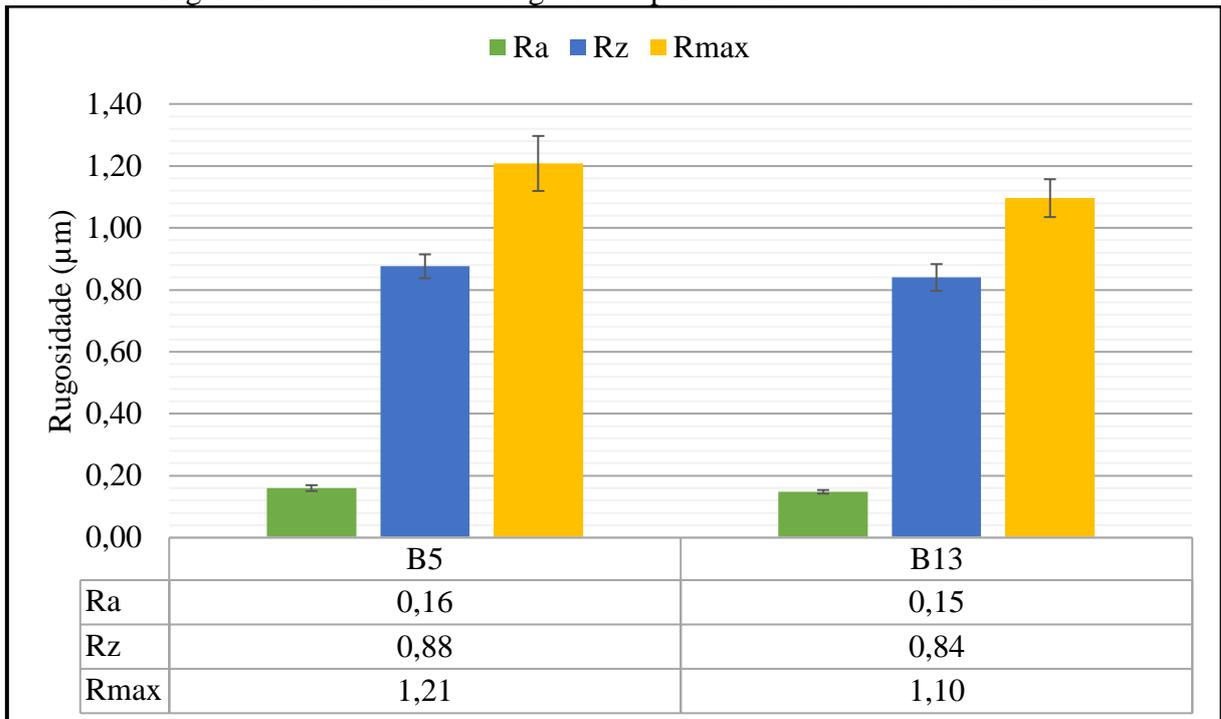
Figura 22 – Parâmetros de rugosidade para o início da vida da ferramenta



Fonte: O Autor (2019).

Os gráficos das duas figuras apresentam, além dos valores médios obtidos para os três parâmetros, a incerteza de medição. Nesta análise, a dispersão dos valores do parâmetro  $R_a$  para as duas ferramentas foi pequena. A maior dispersão de valores foi observada no parâmetro  $R_{max}$  da ferramenta B5 em final de vida. Todos os valores de incerteza foram obtidos a partir de um intervalo de 30 mm de comprimento, sendo que para as medições do início de vida, os primeiros 10 mm usinados não foram levados em consideração. Tal critério foi adotado já que na entrada da ferramenta ocorrem as maiores vibrações, que poderiam mascarar os resultados.

Figura 23 - Parâmetros de rugosidade para o fim de vida da ferramenta



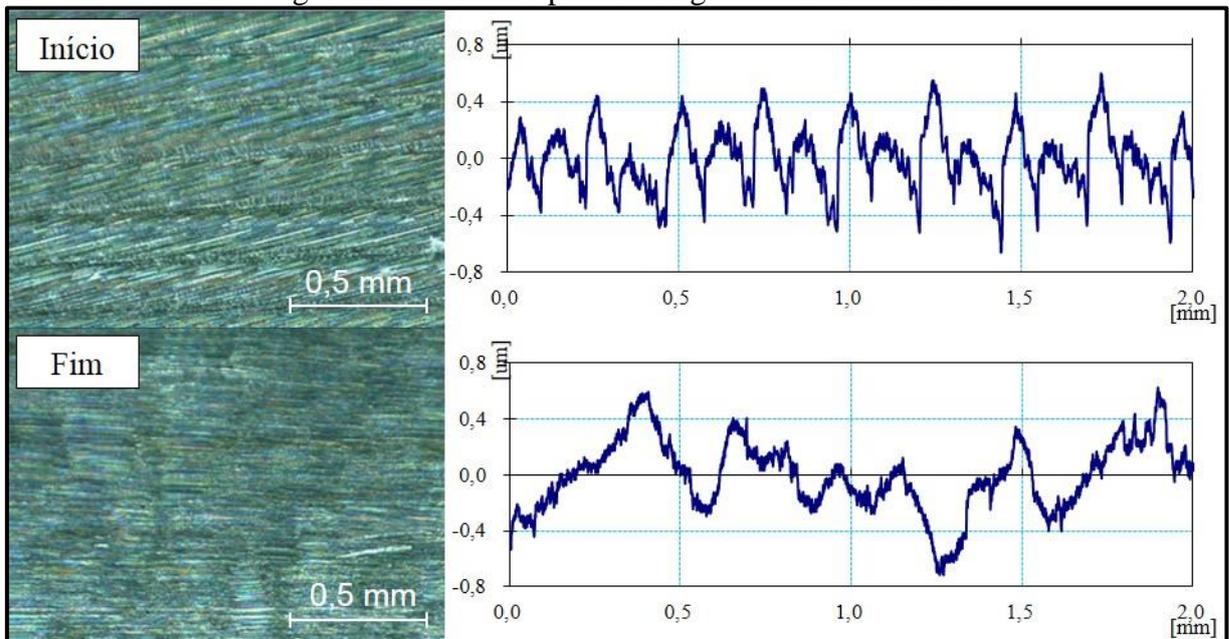
Fonte: O Autor (2019).

Em uma análise mais detalhada sobre o parâmetro  $R_{max}$  foi possível observar que para a fresa B5 os valores permaneceram estáveis, apresentando diferenças parecidas entre os maiores vales e picos na superfície usinada, tanto para a ferramenta nova quanto para a ferramenta desgastada. Já para a ferramenta B13 os valores foram maiores para o início de vida, impulsionados pelo defeito na quina de um dos gumes. Com o aumento do desgaste ocorreu o ajuste do gume e os valores finais de rugosidade caíram significativamente.

Na comparação direta com o tratamento comercial realizado por Carrer (2018), onde a mídia de referência HSC 1/300 foi utilizada, os valores de rugosidade mantiveram uma estabilidade maior entre início e fim de vida, sendo esta uma vantagem importante para um processo de usinagem.

Além da avaliação de rugosidade, a textura também esteve em análise no trabalho. As imagens foram coletadas nas condições de início e de fim de vida da ferramenta e proporcionaram um complemento à análise de acabamento do componente. A Figura 24 apresenta a textura para a fresa B5. Na fase inicial do fresamento a superfície gerada apresentou características típicas como marcas bem definidas e um perfil de rugosidade com padrão de repetição. Enquanto isso, na região usinada com a ferramenta em fim de vida, o perfil de rugosidade não exibiu um comportamento com padrão de repetição definido.

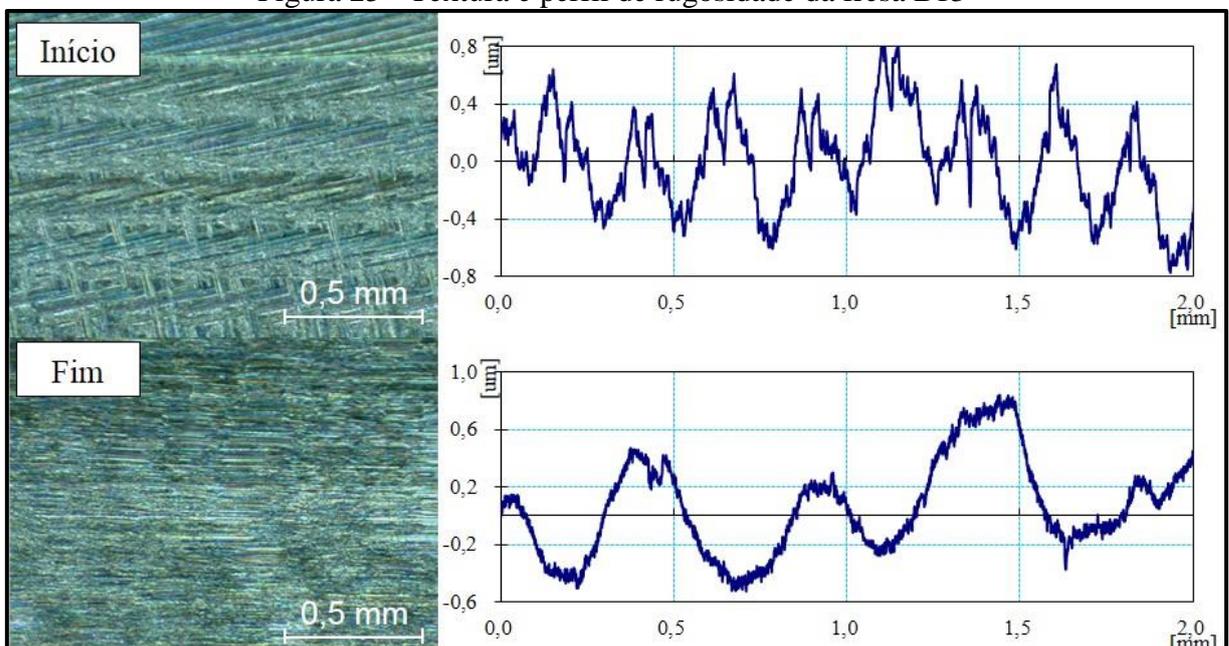
Figura 24 - Textura e perfil de rugosidade da fresa B5



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 25 mostra o efeito de recalque de material nos primeiros metros de usinagem. Ali, o cavaco foi pressionado contra a peça durante a passagem da ferramenta, produzindo um perfil de rugosidade com picos e vales maiores, ainda que um padrão de repetição tenha ficado evidente. O lascamento na quina de um dos gumes foi o responsável pelo surgimento desse recalque. Para o fim de vida, novamente o perfil de rugosidade não apresentou padrão definido.

Figura 25 - Textura e perfil de rugosidade da fresa B13



Fonte: O Autor (2019).

#### 4.4 VIDA DA FERRAMENTA

Na mesma medida em que o corpo de prova foi avaliado através de medições de rugosidade e textura, as ferramentas passaram por medições periódicas do desgaste máximo de flanco ( $VB_{max}$ ). O critério foi utilizado para indicar o momento de fim de vida da ferramenta, e, através destas medições periódicas, foi possível gerar as curvas que mostram o comportamento de desgaste das ferramentas durante os ensaios.

##### 4.4.1 Curvas de comportamento de desgaste das ferramentas

Todos os valores de  $VB_{max}$  foram mensurados em intervalos de cinco em cinco metros, conforme descrição do capítulo 3 deste trabalho. Estas medições, atreladas ao comprimento usinado, possibilitaram a geração das curvas de comportamento de desgaste das fresas de topo.

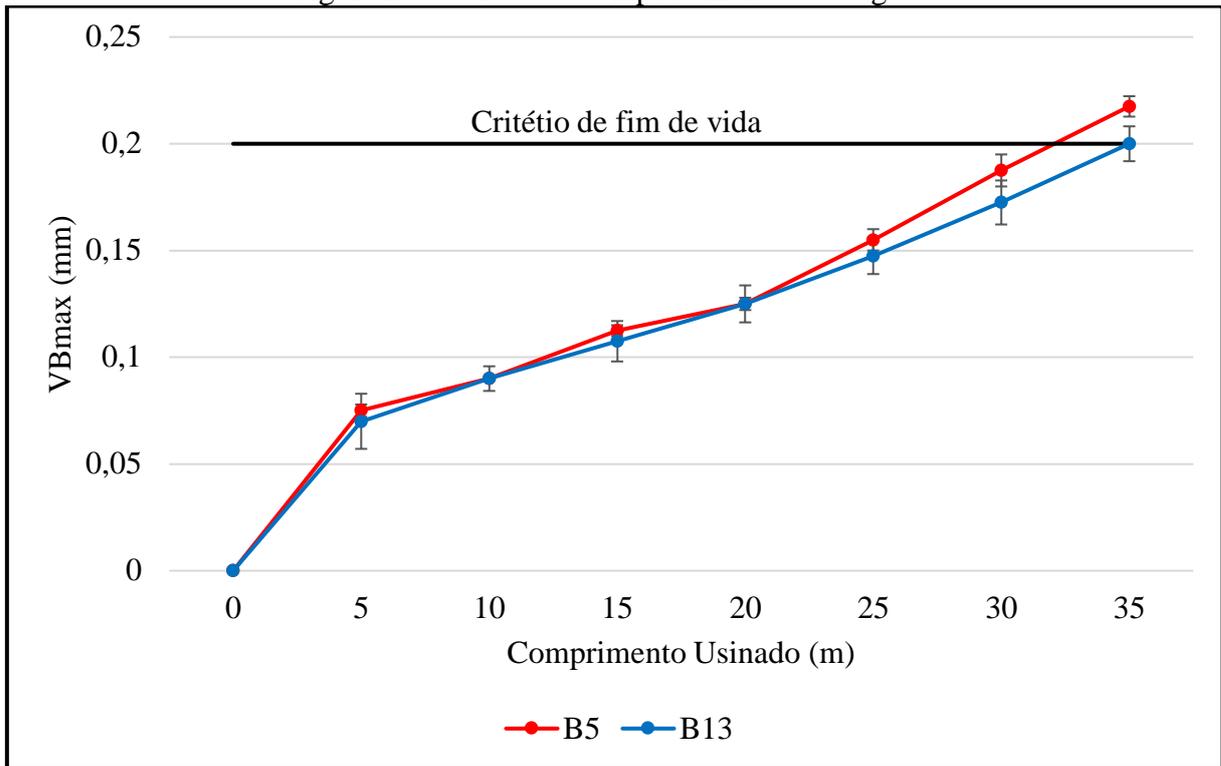
As duas ferramentas utilizadas neste ensaio foram comparadas com trabalhos passados como Ost (2016) e Carrer (2018). Destes estudos, foram extraídos os dados de fresas reafiadas e sem nenhum tipo de tratamento, de fresas com tratamento comercial com a média de referência HSC 1/300 e também de fresas tratadas com uma primeira versão da mesma média em estudo neste trabalho.

As duas usinagens foram realizadas sob as mesmas condições e as curvas de desgaste são apresentadas na Figura 26. Vale ressaltar que as ferramentas atingiram o critério de fim de vida antes de atingirem o estágio III da curva de comportamento de desgaste, ou seja, nenhuma delas entrou em colapso.

Ficou evidente que não houve um aumento da vida útil da ferramenta já que as duas fresas de topo apresentaram um comprimento usinado menor do que as fresas testadas sob condições de reafiadas e sem nenhum tipo de tratamento. A vantagem em questão ficou por conta da estabilidade e dos baixos valores de rugosidade durante todo o processo de fresamento, evidenciados anteriormente.

O gráfico da Figura 26 apresenta ainda a dispersão dos valores com relação à média do desgaste máximo de flanco, coletado sobre os quatro gumes de cada ferramenta a cada pausa na usinagem.

Figura 26 - Curvas de comportamento de desgaste



Fonte: O Autor (2019).

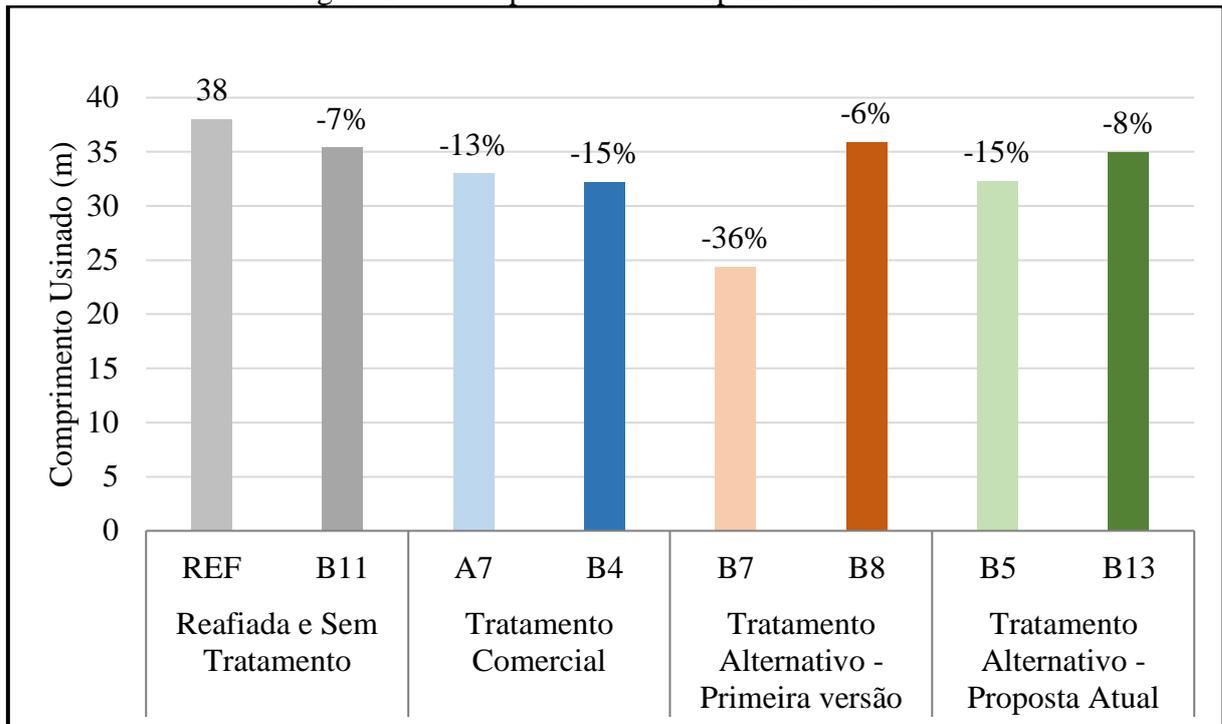
Através das curvas acima foi possível observar o comportamento clássico de desgaste das ferramentas de usinagem. Ficou evidente, para as duas fresas de topo estudadas, o desgaste acentuado nos primeiros cinco metros. Esse efeito é conhecido como ajuste do gume, e ocorre no contato inicial entre a ferramenta e a peça. Após este período, o crescimento do desgaste passou a ter um comportamento bastante linear, até o mesmo atingir o valor estabelecido como critério de fim de vida.

A ferramenta B5 apresentou valores de desgaste bastante semelhantes em todos os gumes durante o ensaio e atingiu o fim de vida após a usinagem de 32,4 m, ficando abaixo dos 38 m atingidos pela ferramenta de referência (OST, 2016).

Já fresa de topo B13 apresentou uma dispersão maior de desgaste entre os quatro gumes, porém, com comportamento semelhante à B5, atingiu o desgaste máximo de flanco de 0,2 mm após a usinagem de 35 metros. Com isso, uma das principais vantagens do método de acabamento por arraste, que é a grande capacidade de reprodução do tratamento, pôde ser comprovada.

O comprimento usinado ficou um pouco acima das ferramentas tratadas com a mídia comercial de referência HSC 1/300, que usinaram 33 m e 32,2 m, conforme estudo de Carrer (2018). A comparação gráfica para todos os casos é observada na Figura 27.

Figura 27 – Comparativo de comprimento usinado



Fonte: O Autor (2019).

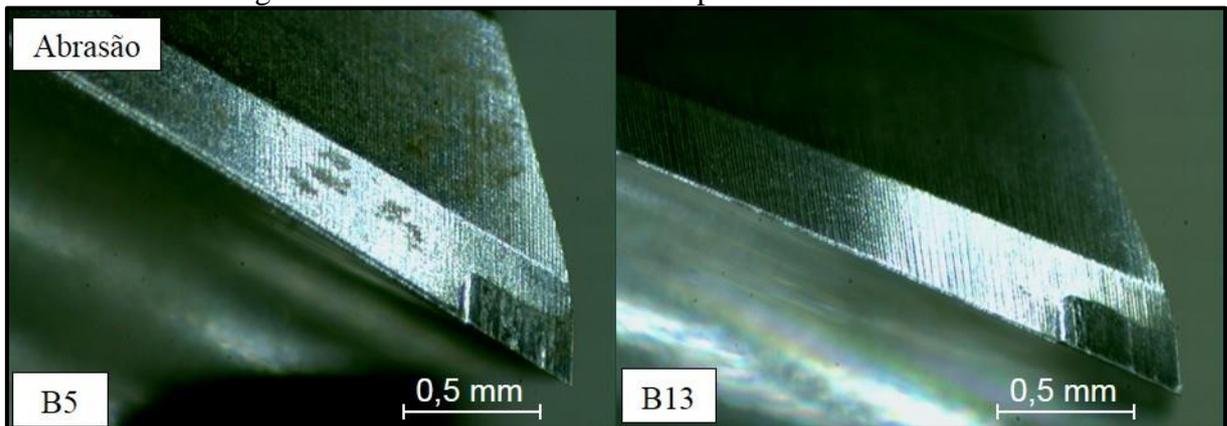
Na comparação com fresas sob o tratamento com uma primeira versão da mídia alternativa, composta por zirconita e casca de amendoim, os valores médios de comprimento usinado também foram superiores aos encontrados por Carrer (2018), evidenciando um avanço na aplicação do tratamento alternativo.

#### 4.4.2 Mecanismos de desgaste

A última avaliação do trabalho buscou evidenciar os principais mecanismos de desgaste presentes durante a usinagem. Na maioria das vezes eles ocorrem de forma simultânea, dificultando a análise. Os mecanismos encontrados neste estudo foram similares aos encontrados em trabalhos passados, comprovando seu aparecimento para esse tipo de usinagem.

Entre os principais mecanismos o que prevaleceu foi a abrasão. Esse mecanismo ocorre em uma faixa muito ampla de velocidades de corte e foi responsável pelo aumento gradativo do desgaste de flanco nas ferramentas, até as mesmas atingirem seu fim de vida. O efeito foi impulsionado por regiões endurecidas do material, ficando evidente na passagem da ferramenta durante os ensaios. As marcas oriundas da abrasão aparecem bem definidas em todos os gumes e podem ser observadas na Figura 28.

Figura 28 - Mecanismo de abrasão após 30 metros usinados

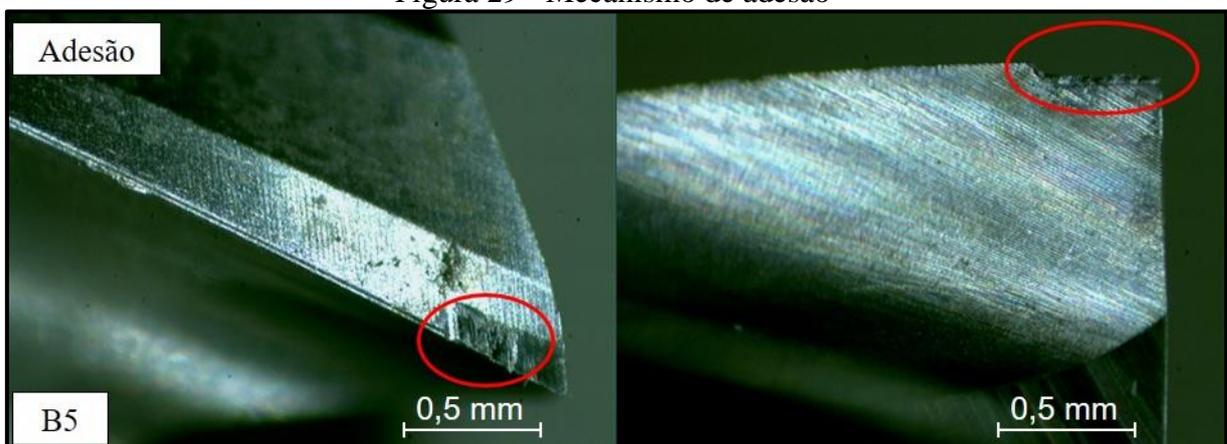


Fonte: O Autor (2019).

A adesão esteve presente em menor intensidade durante os ensaios. Ela surgiu a partir de um determinado momento onde a ferramenta já apresentava um certo desgaste de flanco. Entre uma pausa e outra para as verificações, com a ferramenta se encaminhando para o fim de vida, foi possível identificar material aderido ao gume. A Figura 29 apresenta a região com material aderido a partir de observações da face e do flanco da ferramenta.

A Figura 29 traz ainda a demonstração do recuo do gume. Vale ressaltar que todas as observações foram feitas a partir de ampliações de 30 vezes. Este recuo é normal devido ao desgaste da ferramenta, conforme Klocke (2017).

Figura 29 - Mecanismo de adesão



Fonte: O Autor (2019).

Em geral, os resultados para a vida da ferramenta apresentaram evolução na comparação com o tratamento comercial e com a primeira versão do tratamento alternativo. As ferramentas B5 e B13 usinaram 33,2 m e 35 m, respectivamente, antes de atingir o critério de fim de vida. As avaliações de rugosidade permitiram a identificação de um comportamento

bastante estável durante todo o ensaio, sendo esta a grande vantagem identificada no estudo. Além disso, os valores foram menores na comparação com estudos anteriores.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no estudo proporcionaram uma melhor compreensão da influência do tratamento de gume para ferramentas de usinagem, em especial, neste caso, para o método de acabamento por arraste. Com o *know-how* adquirido em trabalhos anteriores, a mídia composta por zirconita, casca de amendoim e óleo foi elaborada, tendo como maior obstáculo a mistura do óleo responsável pela união dos elementos.

A avaliação qualitativa das ferramentas proporcionou a compreensão dos efeitos do tratamento de gume por arraste sobre as mesmas. Elas apresentaram melhoras na superfície após o tratamento, com uma região mais homogênea e sem a presença de aresta viva. Ficou claro que pequenos defeitos na região do gume, como o encontrado na fresa B13, mantém grande influência nos resultados que são atingidos em um processo de usinagem. Os efeitos do tratamento foram mais evidentes a partir da observação da face das ferramentas.

Os valores obtidos para a rugosidade foram bastante estáveis entre o início e o final do processo, e mostraram como o tratamento por arraste pode influenciar no controle desse parâmetro durante a usinagem. Ainda, a análise indica que pequenos defeitos na superfície da ferramenta possuem forte influência na geração dos valores e do perfil de rugosidade, algo que pôde ser observado através da textura obtida no corpo de prova.

As duas ferramentas apresentaram um comportamento de desgaste semelhante, com um comprimento usinado muito próximo, evidenciando a capacidade de reprodução do tratamento por arraste. Considerando o valor médio encontrado para a primeira versão desta mesma mídia alternativa, de trabalhos de outros autores, houve um aumento de vida útil das fresas de topo.

Os mecanismos de desgaste responsáveis por conduzir as ferramentas ao fim de vida, e que puderam ser identificados, foram a abrasão e a adesão. A abrasão foi predominante e esteve presente em praticamente todo o tempo de vida das fresas de topo enquanto a adesão se manifestou em alguns momentos do ensaio.

## REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, P.. New Developments in the Theory of the Metal-Cutting Process: Part I. The Ploughing Process in Metal Cutting. **Journal Of Engineering For Industry**, [s.l.], v. 82, n. 4, p.348-356, nov. 1960. ASME International.
- BET L., **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e sondas ópticas tipo seguidor**, Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 243p, 1999.
- BIERMANN, D.; BASCHIN, A. Influence of cutting edge geometry and cutting edge radius on the stability of micromilling processes. **Production Engineering**, [s.l.], v. 3, n. 4-5, p.375-380, 13 nov. 2009.
- BIERMANN, D.; TERWEY, I. Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes, **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, n. 1, 76-80, 2008.
- BIERMANN, D.; WOLF, M.; ASSMUTH, R. Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills. **Procedia CIRP**, n. 1, p.172 – 177, 2012.
- BOGDAN B. M., SABIN P. M., STEFAN S., DAN P., **Unconventional Technologies in preparation of microgeometry edge on cutting tools. Nonconventional Technologies Review**, Romênia, v. 17, n. 4, p.10-16, dez. 2013.
- BRALLA J. G., Handbook of Manufacturing Processes. **Industrial Press**, 2007.
- CARRER, Mylena. **Influência do tratamento do cume por arraste sobre a qualidade superficial da peça e a vida da ferramenta para o processo de fresamento**. 2018. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.
- DENKENA, B.; BIERMANN, D.. **Cutting edge geometries**. *Cirp Annals*, [s.l.], v. 63, n. 2, p.631-653, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>.
- DENKENA, B.; KOEHLER, J.; REHE, M. Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel. **Procedia CIRP**, v. 1, p. 190-195, 2012.
- DENKENA, B.; LUCAS, A.; BASSETT, E.. Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load. **Cirp Annals**, [s.l.], v. 60, n. 1, p.73-76, 2011
- DINIZ A. E., MARCONDES F. C., COPPINI N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. MM Editora. 1999.
- FERRARESI D., **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: E. Blucher, 3v, 1970.
- HRONEK, Ondřej; ZETEK, Miroslav; BAKĽA, Tomáš. The Immersion Depth Influences on Cutting Edge Radius During Drag Finishing. **Proceedings Of The 28th Daaam International Symposium**, Vienna, Austria, p.1030-1036, jan. 2017.

KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. R., **Manufacturing Engineering and Technology**. Seventh edition. Singapore: Pearson, 2013. 1180 p.

KLOCKE, F.; KRATZ, H.. Advanced Tool Edge Geometry for High Precision Hard Turning. **Cirp Annals**, [s.l.], v. 54, n. 1, p.47-50, 2005. Elsevier BV.

KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren I: Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide**. 9. ed. Berlin, Germany: Springer Vieweg, 2017. 682 p.

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

MAISS, O.; GROVE, T.; DENKENA, B.. Influence of asymmetric cutting edge roundings on surface topography. **Production Engineering**, [s.l.], v. 11, n. 4-5, p.383-388, 5 jul. 2017.

NICOLA, Gerson Luiz. **Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço AISI H13 endurecido**. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

OLIVEIRA J.M., **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas para produção de moldes e matrizes**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, RS, 110p, 2006.

OST C. A., **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço p20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificarrefrigerantes**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, RS, 103p, 2016.

OTEC PRÄZISIONSFINISH GMBH (Alemanha). **HSC Granulates**. 2018. Disponível em: <<https://www.otec.de/en/products/media/dry-finishing/dry-grinding-granulate/>>. Acesso em: 03 ago. 2019.

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

REBEYKA, Claudimir José. **Princípios dos processos de fabricação por usinagem**. Curitiba: Intersaberes, 2016.

RECH, J. et al. **Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts**. v. 259, n. 7-12, p.1168-1176, jul. 2005. Elsevier BV.

RISSE, K. **Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl**. Dissertação de Mestrado, RWTH Aachen, Aachen, 153p., 2006.

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

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte I**. 6. ed. Florianópolis, Santa Catarina: Editora da Ufsc, 2005. 249 p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte II: Brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. 3. ed. Florianópolis, Santa Catarina: Editora da Ufsc, 2005. 314 p.

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

TOENSHOFF, Hans Kurt; DENKENA, Berend. **Basics of Cutting and Abrasive Processes**. Hannover: Springer, 2013. 399 p.

UHLMANN E., KUCHE Y., OBERSCHMIDT D., POLTE J., Droplet removal from PVD-coated micro-milling tools with the immersed tumbling process. **European Society For Precision Engineering And Nanotechnology -euspen-**, Hannover, Germany, p.255-256, jun. 2017.

UHLMANN E., OBERSCHMIDT D., LÖWENSTEIN A., KUCHE Y., Influence of cutting edge preparation on the performance of micro milling tools. **Procedia Cirp**, Berlin, Germany, v. 46, p.214-217, 2016.

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

VENTURA, Carlos E. H. et al. The influence of the cutting tool microgeometry on the machinability of hardened AISI 4140 steel. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 90, n. 9-12, p.2557-2565, 19 out. 2016. Springer Nature.

VOPAT T., KURUC M., SIMNA V., ZAUJEC R., PETERKA J., Cutting Edge Microgeometry and Preparation Methods. **Proceedings Of The 28th Daaam International Symposium**, Vienna, Austria, p.384-391, jan. 2017.

ZHAO T., ZHOU J. M., BUSHLYA V., STAHL J. E., Effect of cutting edge radius on surface roughness and tool wear in hard turning of AISI 52100 steel. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, p.3611-3618, 26 jan. 2017.

ZHAO X., HE L., YUAN S., ZHENG W., Influence of Edge Preparation Parameters on the Cutting Edge in Drag Finishing. **Key Engineering Materials**, [s.l.], v. 693, p.1067-1073, maio 2016. Trans Tech Publications.