

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**DANIEL ANDRÉ**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DO GUME SOBRE A VIDA ÚTIL DAS BROCAS  
DE PONTA INTERCAMBIÁVEL NA FURAÇÃO DE AÇO 1030**

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DANIEL ANDRÉ**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DO GUME SOBRE A VIDA ÚTIL DAS BROCAS  
DE PONTA INTERCAMBIÁVEL NA FURAÇÃO DE AÇO 1030**

Dissertação apresentada como requisito para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

A555i André, Daniel

Influência do tratamento do gume sobre a vida útil das brocas de ponta intercambiável na furação de aço 1030 [recurso eletrônico] / Daniel André. – 2025.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Usinagem 2. Desgaste mecânico. 3. Brocas (Ferramentas). 4. Aço. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.98

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)  
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

**DANIEL ANDRÉ**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DO GUME SOBRE A VIDA ÚTIL DAS BROCAS  
DE PONTA INTERCAMBIÁVEL NA FURAÇÃO DE AÇO 1030**

Dissertação apresentada à Universidade de  
Caxias do Sul como requisito para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área  
de concentração: Projeto e Fabricação.

Orientador Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann

**Aprovado em 17/02/2026**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann  
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli  
Universidade de Caxias do Sul

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

Prof. Dr. Leandro Luis Corso  
Universidade de Caxias do Sul

## AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pela vida, pela saúde, pela sabedoria e por sustentar-me em todos os momentos desta caminhada. Sua graça me fortaleceu nos desafios e me conduziu até a conclusão desta etapa tão significativa.

À minha família, base e motivação de toda esta jornada. Em especial à minha esposa Elisa, pelo amor, compreensão, incentivo constante e por caminhar ao meu lado em todos os momentos, mesmo nos períodos de maior ausência e dedicação aos estudos. Às minhas filhas, Júlia e Nathalia, fontes permanentes de alegria, inspiração e propósito, que com carinho e paciência compreenderam as horas dedicadas a este trabalho.

Ao professor orientador, Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann, pela orientação segura, disponibilidade, conhecimento compartilhado e confiança depositada ao longo deste trabalho. Sua condução foi fundamental para o desenvolvimento científico e pessoal durante o mestrado.

Aos colegas que caminharam juntos nesta jornada acadêmica, compartilhando experiências, desafios, aprendizados e momentos de incentivo mútuo. A convivência e a troca de conhecimentos tornaram essa trajetória mais rica e significativa.

Aos amigos que, de diferentes formas, contribuíram e apoiaram esta caminhada, seja por meio de palavras de incentivo, auxílio técnico ou simplesmente pela presença e encorajamento nos momentos necessários.

Aos professores que compõem a banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas valiosas contribuições que certamente contribuirão para o seu aprimoramento.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta caminhada e contribuíram para a realização deste objetivo, registro minha sincera gratidão.

## RESUMO

A vida útil de ferramentas de corte é um dos principais fatores que impactam a produtividade em operações de usinagem. A preparação do gume surge como alternativa para melhorar o desempenho e reduzir o desgaste. Este trabalho avalia a influência de diferentes métodos de preparação do gume sobre o desgaste de brocas de ponta intercambiável na furação do aço SAE 1030. Foram estudadas três condições de ferramenta: ponta nova tratada por microjateamento e duas pontas reafiadas, submetidas aos tratamentos de arraste e escovamento. A metodologia envolveu a caracterização geométrica do gume, o monitoramento do desgaste de flanco (VBmax) ao longo de 30 metros de furação e a análise microscópica dos mecanismos predominantes de desgaste. Os ensaios foram realizados em centro de usinagem horizontal, sob velocidade de corte de 120 m/min, avanço de 0,22 mm/rot e profundidade de furação de 30 mm. A Análise de Variância (ANOVA) foi empregada para comparar estatisticamente as condições com duas réplicas válidas ao final do ensaio (arraste e microjateamento), considerando o valor final de VBmax aos 30 metros de furação. O tratamento por arraste apresentou o melhor desempenho, com desgaste reduzido e evolução estável ao longo da usinagem. Ao final de 30 metros, o VBmax foi de aproximadamente 0,10 mm para o arraste, enquanto o microjateamento atingiu 0,18 mm e o escovamento 0,19 mm, este último com falha prematura de uma réplica. Predominou desgaste por abrasão e adesão nas três condições, com maior concentração de danos na região da quina para o escovamento. A ANOVA confirmou diferença estatisticamente significativa entre arraste e microjateamento, evidenciando que o método de preparação do gume influenciou o desgaste final das ferramentas. Conclui-se que o tratamento por arraste é o mais eficaz para restabelecer o desempenho de brocas reafiadas na furação do aço SAE 1030, proporcionando maior estabilidade do desgaste e desempenho superior ao longo de 30 metros de usinagem.

Palavras-chave: Furação; Vida útil da ferramenta; Preparação do gume; Desgaste; Brocas de ponta intercambiável.

## ABSTRACT

Tool life is one of the main factors affecting productivity in machining operations. Cutting edge preparation has emerged as an alternative to improve tool performance and reduce wear. This study evaluates the influence of different cutting edge preparation methods on the wear behavior of indexable insert drills during drilling of SAE 1030 steel. Three tool conditions were investigated: a new insert treated by micro-blasting and two re-sharpened inserts subjected to drag finishing and brushing treatments. The methodology included geometric characterization of the cutting edge, monitoring of flank wear (VBmax) over 30 meters of drilling length, and microscopic analysis of the predominant wear mechanisms. Drilling tests were performed on a horizontal machining center at a cutting speed of 120 m/min, feed rate of 0.22 mm/rev, and drilling depth of 30 mm. Analysis of Variance (ANOVA) was applied to statistically compare the conditions with two valid replicates at the end of the test (drag finishing and micro-blasting), considering the final VBmax value after 30 meters of drilling. Drag finishing showed the best performance, with reduced wear and stable wear progression throughout machining. After 30 meters, VBmax was approximately 0.10 mm for drag finishing, while micro-blasting reached 0.18 mm and brushing reached 0.19 mm, the latter presenting premature failure of one replicate. Abrasion and adhesion were the predominant wear mechanisms in all conditions, with greater damage concentration at the corner region for the brushing treatment. ANOVA confirmed a statistically significant difference between drag finishing and micro-blasting, indicating that the cutting edge preparation method influenced the final tool wear. It is concluded that drag finishing is the most effective treatment for restoring the performance of re-sharpened drills in SAE 1030 steel drilling, providing greater wear stability and improved performance over 30 meters of machining.

Keywords: Drilling; Tool life; Cutting-edge preparation; Wear; Indexable drills.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de processos de furação. ....	12
Figura 2 - Macrogeometria da cunha da broca helicoidal. ....	14
Figura 3 - Componentes principais de uma broca de ponta intercambiável. ....	15
Figura 4 - Arredondamento do Gume. ....	16
Figura 5 - Principais geometrias de tratamento de gume. ....	17
Figura 6 - Aspectos da geometria da ferramenta. ....	18
Figura 7 - Erro de caracterização causado pelo método de gume. ....	18
Figura 8 - Método de caracterização do fator de forma do gume. ....	19
Figura 9 - Classificação dos processos de preparação de gume. ....	21
Figura 10 – Movimentos do processo por arraste. ....	22
Figura 11 - Escovamento com filamentos de nylon abrasivos. ....	23
Figura 12 - Vida útil da ferramenta em função da relação fator K. ....	26
Figura 13 - Locais para medições dos desgastes em brocas. ....	30
Figura 14 - Comportamento típico da curva de desgaste. ....	31
Figura 15 - Mecanismos de desgastes em função da temperatura. ....	32
Figura 16 – Fluxograma geral das etapas. ....	34
Figura 17 – Sistema de fixação da broca. ....	36
Figura 18 – Ponta ICP 068 com dupla guia. ....	37
Figura 19 - Microscópio Dino Lite. ....	38
Figura 20 – Equipamento Zoller Smile 400. ....	39
Figura 21 - Broca DCN com a ponta ICP montada. ....	40
Figura 22 - Rugosímetro portátil Mitutoyo Surfrest SJ-310. ....	40
Figura 23 - Corpo de prova utilizado nos ensaios. ....	42
Figura 24 – Ângulo da cunha de corte da condição nova. ....	46
Figura 25 – Ângulo de ponta e raio de quina da condição nova. ....	46
Figura 26 – Ponta nova tratamento por microjateamento. ....	47
Figura 27 - Ângulo da cunha de corte condição reafiada com arraste. ....	48
Figura 28 - Ângulo de ponta e raio de quina da condição arraste. ....	48
Figura 29 – Ponta reafiada tratamento por arraste. ....	49
Figura 30 - Ângulo da cunha condição escovamento. ....	50
Figura 31 - Ângulo de ponta e raio de quina da condição escovamento. ....	50
Figura 32 – Ponta reafiada tratamento por escovamento. ....	51

Figura 33 – Evolução do desgaste de flanco (VBmax). .....	53
Figura 34 - Manifestação inicial de desgaste (Microjateamento, 5 m). .....	58
Figura 35 - Evolução do desgaste (Microjateamento, 15 m). .....	59
Figura 36 - Fase acelerada do desgaste (Microjateamento, 30 m). .....	59
Figura 37 - Ampliação do desgaste no gume (Microjateamento, 30 m). .....	60
Figura 38 – Desgaste de flanco após 5 m. ....	61
Figura 39 - Desgaste de flanco após 15 m. ....	62
Figura 40 - Desgaste de flanco após 30 m. ....	62
Figura 41 - Ampliação da quina e do gume após 30 m de furação. ....	63
Figura 42 - Manifestação inicial de falha (Escovamento, 5 m). ....	64
Figura 43 - Rápida Progressão de Desgaste (Escovamento, 15 m). ....	65
Figura 44 - Desgaste Crítico (Escovamento, 30 m) .....	66
Figura 45 – Ampliação da quina, condição reafiada com escovamento .....	66

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	9
1.2	OBJETIVOS .....	10
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>12</b>
2.1	FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES DO PROCESSO DE FURAÇÃO.....	12
2.2	BROCA HELICOIDAL .....	13
<b>2.2.1</b>	<b>Brocas com ponta intercambiável de metal duro .....</b>	<b>14</b>
2.3	PREPARAÇÃO DO GUME .....	15
<b>2.3.1</b>	<b>Caracterização da geometria do gume .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Tipos de processos de preparação do gume .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Tratamento por arraste.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Tratamento por escovamento .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Tratamento por microjateamento.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Efeitos do tratamento do gume sobre a vida útil da ferramenta.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Trabalhos correlatos e lacunas da literatura .....</b>	<b>27</b>
2.4	USINABILIDADE .....	28
2.5	DESGASTE DAS BROCAS.....	29
<b>2.5.1</b>	<b>Mecanismos de desgaste .....</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.1	CORPO-DE-PROVA (material).....	35
3.2	MÁQUINA FERRAMENTA.....	36
3.3	FERRAMENTA DE CORTE.....	36
<b>3.3.1</b>	<b>Medição de rugosidade.....</b>	<b>40</b>
3.4	PROCESSO DE USINAGEM E AVALIAÇÃO DO DESGASTE .....	41
3.5	PROCESSAMENTO DOS DADOS COM ANOVA.....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>45</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO GUME .....	45
<b>4.1.1</b>	<b>Ferramenta nova tratada por microjateamento.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Ferramenta reafiada tratada por arraste.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Ferramenta reafiada tratada por escovamento .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Rugosidade da face de folga.....</b>	<b>51</b>

4.2	EVOLUÇÃO DO DESGASTE E COMPROVAÇÃO ESTATÍSTICA .....	52
4.2.1	<b>Desgaste VBmax - ferramenta nova tratada por microjateamento .....</b>	<b>53</b>
4.2.2	<b>Desgaste VBmax - ferramenta reafiada tratada por arraste.....</b>	<b>54</b>
4.2.3	<b>Desgaste VBmax - ferramenta reafiada tratada por escovamento .....</b>	<b>55</b>
4.2.4	<b>Síntese e comparação com critérios de vida .....</b>	<b>55</b>
4.2.5	<b>Análise de variância (ANOVA) e validação .....</b>	<b>56</b>
4.3	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS MECANISMOS E TIPOS DE DESGASTE.....	57
4.3.1	<b>Mecanismos e tipos de desgaste - ferramenta nova tratada por microjateamento</b> <b>57</b>	
4.3.2	<b>Mecanismos e tipos de desgastes - ferramenta reafiada tratada por arraste.....</b>	<b>61</b>
4.3.3	<b>Mecanismos e tipos de desgastes - ferramenta reafiada tratada por escovamento</b> <b>63</b>	
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	67
5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A usinagem desempenha um papel essencial na indústria metalúrgica e é um dos processos fundamentais na fabricação de componentes de alta precisão. Na produção de peças críticas, como componentes para motores automotivos, esse processo garante a qualidade, a confiabilidade e a reprodutibilidade dimensional dos produtos. Entre as diversas operações de usinagem, a furação se destaca, representando cerca de 30% de todas as etapas de manufatura (LÓPEZ DE LACALLE et al., 2011). Essa operação influencia diretamente a eficiência produtiva, a qualidade final das peças e os custos operacionais, tornando-se estratégica para o desempenho global da produção.

Dentro desse contexto, destaca-se o aço carbono, amplamente utilizado em diferentes segmentos industriais devido à sua resistência, durabilidade e facilidade de conformação. Ele é classificado em três categorias: baixo carbono (até 0,30%), médio carbono (0,30% a 0,60%) e alto carbono (0,60% a 1%) (COPPERMETAL, 2024). O aço SAE 1030, foco deste estudo, pertence à classe de médio carbono e apresenta grande relevância industrial, ao mesmo tempo em que impõe desafios específicos ao processo de furação, devido à sua composição e propriedades mecânicas intermediárias.

Um desses desafios está relacionado ao desempenho das ferramentas de corte. As brocas de ponta intercambiável são amplamente utilizadas por oferecerem flexibilidade operacional, facilidade de substituição e menor custo por furo. No entanto, durante operações de furação em ambiente industrial, observou-se que, após o processo de reafiação, essas brocas podem apresentar redução significativa da vida útil quando comparadas às ferramentas novas, em alguns casos atingindo valores próximos a 50%. Apesar da relevância prática dessa condição, verificou-se escassez de estudos na literatura que abordem o desempenho de brocas de pontas intercambiáveis reafiadas associadas a diferentes métodos de preparação de gume.

Entre os fatores que mais influenciam esse comportamento está a condição do gume da ferramenta. Segundo Santana (2015), uma preparação adequada do gume é essencial para aumentar a resistência ao desgaste e prolongar a vida útil da ferramenta. A reafiação, contudo, pode introduzir defeitos como rebarbas, lascas e marcas de retificação, os quais comprometem a eficiência de corte. Assim, a preparação do gume atua como uma etapa corretiva e de aprimoramento, removendo imperfeições e contribuindo para maior durabilidade e estabilidade do processo (ZHOU et al., 2023).

Diversos métodos de preparação de gume são empregados na indústria, variando quanto à uniformidade geométrica, acabamento superficial, custo, repetibilidade e eficiência de aplicação. A avaliação comparativa entre essas técnicas é fundamental para identificar quais proporcionam melhor equilíbrio entre desempenho e viabilidade econômica, sobretudo em condições reais de usinagem.

Nesse contexto, o objetivo central deste trabalho é avaliar o efeito de diferentes condições de preparação de gume sobre o desgaste de brocas de ponta intercambiável, considerando: a condição nova de fábrica, tratada por microjateamento; e as condições reafiadas, submetidas posteriormente aos tratamentos de escovamento e arraste. Com base na análise comparativa do desgaste e das características geométricas do gume, busca-se identificar os principais fatores que influenciam a redução da vida útil das ferramentas e propor alternativas que melhorem o desempenho e a sustentabilidade do processo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A furação constitui uma das operações mais empregadas nos processos de usinagem, exercendo influência direta sobre a qualidade dimensional, a confiabilidade e a produtividade de componentes metálicos utilizados em diversos setores industriais. No contexto da usinagem do aço SAE 1030, amplamente empregado por seu equilíbrio entre resistência mecânica e usinabilidade, o desempenho das ferramentas de corte representa fator decisivo para a eficiência do processo produtivo.

Observações realizadas em ambiente industrial indicam que, embora brocas de ponta intercambiável novas apresentem bom desempenho, após o processo de reafiação pode ocorrer redução significativa da vida útil, em alguns casos próxima de 50% em relação à condição original. Essa condição compromete a estabilidade do processo, eleva o consumo de ferramentas e impacta os custos operacionais, justificando a busca por alternativas que permitam restabelecer o desempenho dessas ferramentas.

Entre os fatores que influenciam diretamente esse comportamento, destaca-se a condição do gume da ferramenta. Conforme Santana (2015), uma preparação adequada do gume contribui para aumentar a resistência ao desgaste e prolongar a vida útil da ferramenta. Estudos recentes reforçam que a preparação de gume pode remover defeitos gerados na retificação ou reafiação, como rebarbas, lascas e marcas de retífica, melhorando a eficiência de corte e a estabilidade durante a usinagem (PÉREZ-SALINAS; DEL OLMO; LÓPEZ DE LACALLE, 2022; STRAKA; VOPAT, 2022; ZHOU et al., 2023).

Além dos ganhos técnicos e econômicos, a ampliação da vida útil de ferramentas reafiadas contribui para a redução do consumo de matéria-prima e da geração de resíduos industriais, alinhando-se aos princípios de manufatura sustentável e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente aqueles relacionados à produção responsável e à eficiência dos processos industriais.

Assim, a preparação de gume atua não apenas como etapa corretiva, mas também como estratégia de otimização do desempenho das ferramentas. Diante desse contexto, surge a seguinte questão de pesquisa: como melhorar o desempenho e prolongar a vida útil de brocas de ponta intercambiável na usinagem de aço SAE 1030, mantendo eficiência próxima à de uma ferramenta nova?

A hipótese que orienta este trabalho é que a vida útil das brocas após a reafiação está diretamente relacionada à preparação adequada do gume, sendo possível aprimorá-la por meio de tratamentos de superfície controlados, como o arraste e o escovamento. Este estudo justifica-se pela relevância prática do problema e pela contribuição científica de compreender como diferentes tratamentos de gume influenciam o comportamento de desgaste, buscando alternativas que possibilitem maior durabilidade, estabilidade de processos e eficiência na manufatura.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito de diferentes condições de preparação de gume (microjateamento, escovamento e arraste) sobre o desgaste de brocas de ponta intercambiável utilizadas na usinagem de aço SAE 1030.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Do objetivo geral derivam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar a geometria do gume das brocas em suas diferentes condições (nova e reafiadas);
- b) Analisar a evolução do desgaste ( $VB_{max}$ ) e o comportamento das ferramentas ao longo do processo de furação;

- c) Investigar os mecanismos e tipos de desgaste predominantes em cada condição (nova e reafiadas);
- d) Avaliar estatisticamente as diferenças de desempenho entre os tratamentos por meio de métodos quantitativos (ANOVA);

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

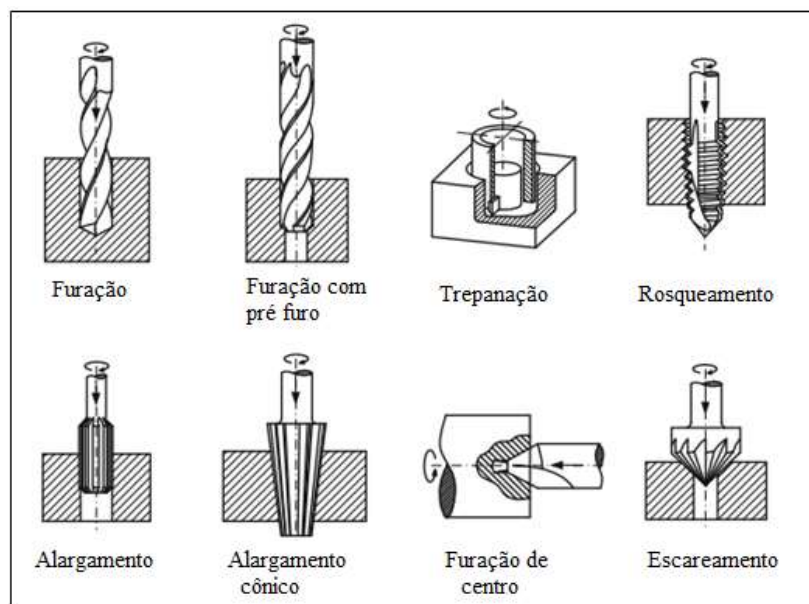
### 2.1 FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES DO PROCESSO DE FURAÇÃO

A furação é definida como um método de usinagem que envolve um movimento central rotativo, onde a ferramenta realiza apenas um movimento de avanço na direção do eixo rotativo. Klocke (2011) destaca algumas particularidades desse processo: a diminuição da velocidade de corte em direção ao centro da broca, a dificuldade na remoção de cavacos, a distribuição desfavorável de calor no ponto de ação, o aumento do desgaste nas quinas cortantes e o atrito das faces contra a parede do furo.

Essas características podem resultar em temperaturas significativamente altas nas interfaces entre broca, peça e cavaco, o que pode gerar aderência de material na superfície usinada e variações geométricas e metalúrgicas superficiais e subsuperficiais (BASAVARAJAPPA et al., 2007).

Diferentes objetivos quanto à taxa de remoção de material, profundidade, precisão dimensional e qualidade superficial levaram ao desenvolvimento de variados processos de furação. A Figura 1 mostra cada um desses processos com suas características específicas e aplicações particulares (KLOCKE, 2011).

Figura 1 - Tipos de processos de furação.



Fonte: Adaptado de (KLOCKE, 2011).

A maioria das peças industriais requer ao menos um furo, geralmente produzido durante ou após processos iniciais como fundição, forjamento ou sinterização (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Muitas vezes, a furação inicial com broca helicoidal é seguida por operações como alargamento, mandrilamento ou torneamento interno, que asseguram precisão dimensional, forma e acabamento superficial.

A eficiência na remoção de cavacos durante a furação é fundamental para a qualidade do processo. Em furos até três vezes o diâmetro da broca, a refrigeração externa costuma ser suficiente. Para profundidades maiores, é necessária refrigeração interna, com canais helicoidais que levam o fluido diretamente à zona de corte, reduzindo calor e atrito, além de facilitar a remoção de cavacos e prevenir o desgaste precoce do gume. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; FERRARESI, 1970; KÖNIG; KLOCKE, 1997)

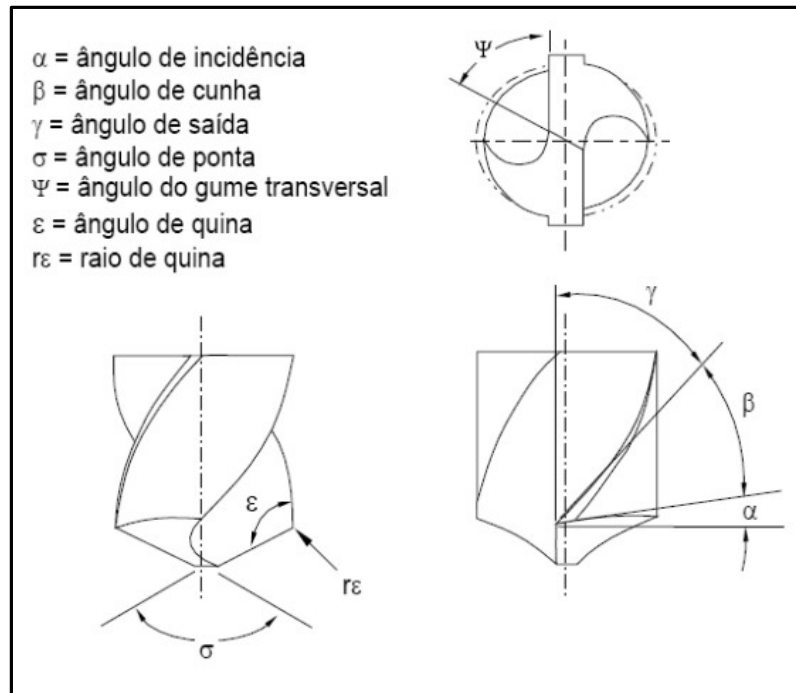
Estudos mais recentes, como os de (ASTAKHOV, 2024; ZHOU et al., 2023), reforçam essas observações, destacando a importância de compreender os fenômenos térmicos e geométricos durante a furação, bem como o papel da refrigeração e da integridade do gume na prevenção de falhas prematuras.

Durante a furação, a cunha da ferramenta penetra no material, causando deformações elásticas e plásticas. Quando a tensão de cisalhamento máxima é superada, o material flui e forma cavacos que deslizam sobre a face da ferramenta. A energia mecânica aplicada é convertida em calor, dissipado entre cavacos, peça, ferramenta e ambiente, além de ser consumido na deformação do material (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

## 2.2 BROCA HELICOIDAL

As brocas helicoidais são as mais utilizadas para furação e seguem padrões normativos (como ABNT NBR ISO 3002-1 e ABNT NBR ISO 5419), que estabelecem conceitos e nomenclaturas. A Figura 2 ilustra a macrogeometria da parte cortante, onde o gume transversal, apesar de ter função limitada no corte, participa do processo deformando plasticamente o material (SCHROETER et al., 1999; CARDOSO, 2014).

Figura 2 - Macrogeometria da cunha da broca helicoidal.



Fonte: Adaptado (STEMMER, 2008)

Existem diferentes tipos de brocas, como chatas, helicoidais, de canais retos, escalonadas, com pastilha de metal-duro, brocas canhão para furação profunda, calibradoras, entre outra (STEMMER, 2008; TRENT; WRIGHY, 2000). As brocas de ponta intercambiável vêm ganhando espaço, por oferecerem soluções produtivas e econômicas (SANDVIK, 2024). Essas brocas, ao serem reafiadas para reaproveitamento da ponta, podem apresentar variações geométricas no gume que influenciam diretamente a estabilidade do corte e a vida útil

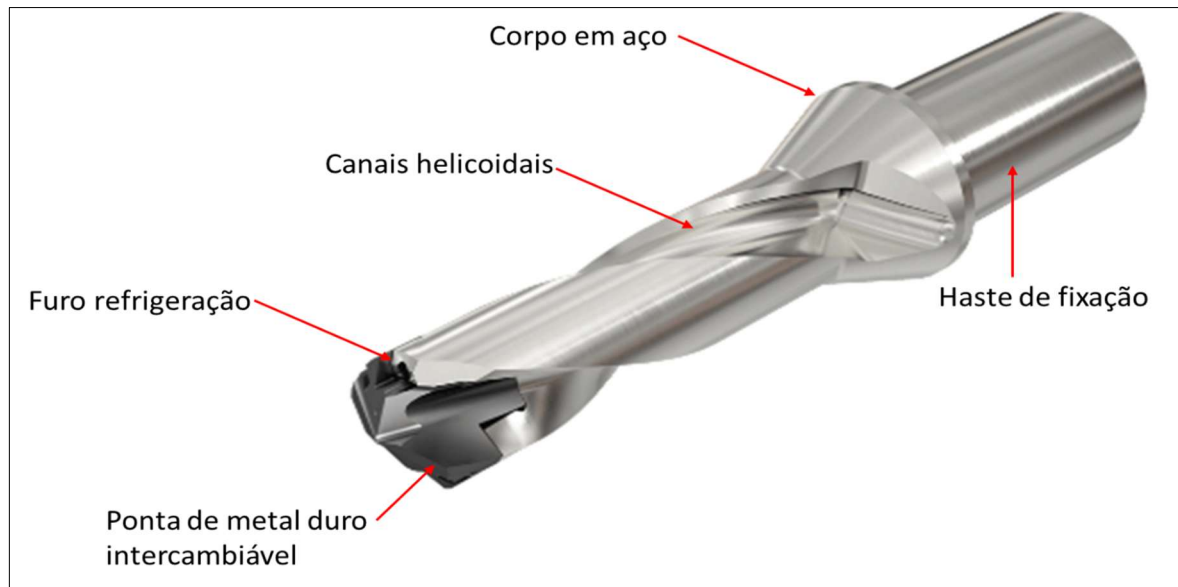
### 2.2.1 Brocas com ponta intercambiável de metal duro

Brocas inteiriças de metal duro nem sempre são economicamente viáveis em aplicações que exigem operações secundárias ou trocas frequentes. Danford (2013) destaca que as brocas de ponta intercambiável substituíram, em muitos casos, as brocas sólidas de custo elevado e as brocas de inserto indexável, que apresentam menor precisão, oferecendo um equilíbrio entre custo, produtividade e qualidade.

Essas ferramentas combinam a precisão das brocas inteiriças com a flexibilidade dos sistemas de insertos, apresentando diâmetros típicos entre 9,5 e 33 mm, tolerâncias IT9–IT11 e elevada rigidez. A ponta de metal duro sólido é responsável pelo corte, enquanto o corpo de aço fornece robustez e permite múltiplas trocas de ponta. Além disso, recursos como canais

helicoidais internos para evacuação de cavacos e geometrias otimizadas reduzem o atrito e as forças de corte, ampliando a vida útil e a estabilidade dimensional (DANFORD, 2013). A Figura 3 ilustra os principais componentes de uma broca de ponta intercambiável.

Figura 3 - Componentes principais de uma broca de ponta intercambiável.



Fonte: Adaptado de Iscar (2025).

Na usinagem de materiais de maior resistência, como os aços, essas brocas demonstram desempenho superior, mas também apresentam desafios específicos. Em aplicações de furação em aço para rolamentos, observa-se desgaste acelerado na quina, o que reforça a necessidade de controle rigoroso dos parâmetros de corte e de estratégias adequadas de preparação do gume (MIKLOŠ et al., 2019).

Em síntese, as brocas de ponta intercambiável representam uma evolução tecnológica importante, unindo desempenho e economia. Entretanto, seu desempenho e durabilidade estão diretamente associados à integridade do gume, cuja condição determina a eficiência e a estabilidade do processo de furação.

### 2.3 PREPARAÇÃO DO GUME

A eficiência do processo de corte está diretamente relacionada à integridade e à condição do gume da ferramenta. Após sucessivos ciclos de afiação, pequenas irregularidades podem surgir, comprometendo a estabilidade do processo e acelerando o desgaste. Para

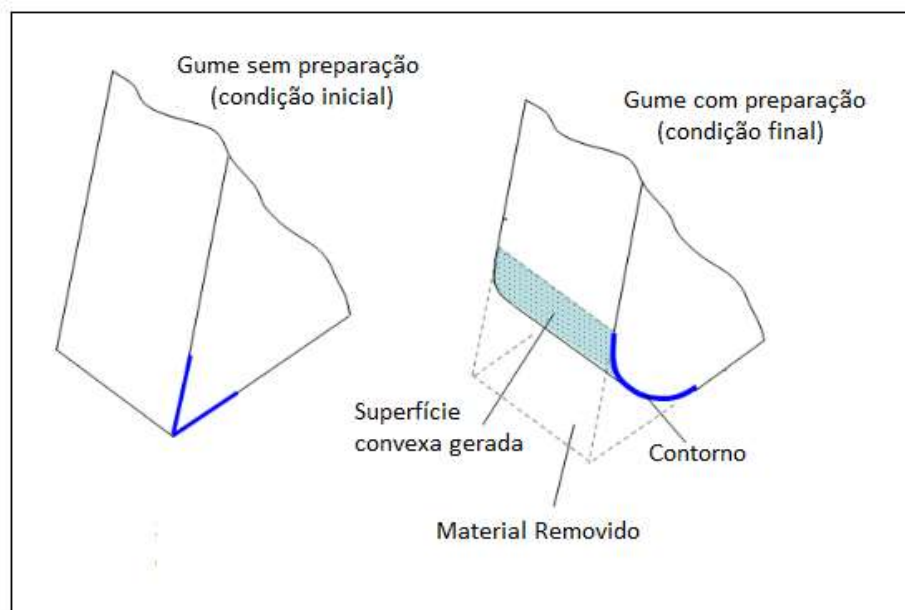
minimizar esses efeitos e restabelecer o desempenho da ferramenta, diferentes técnicas de preparação do gume são amplamente empregadas na indústria.

A presença de um raio ou chanfro bem dimensionado modifica as condições de contato entre ferramenta, cavaco e peça, influenciando a geração de calor, as forças de corte e a estabilidade do processo — fatores que impactam diretamente a qualidade superficial e a vida útil da ferramenta (VENTURA et al., 2017). Microdefeitos decorrentes de retificação inadequada ou manuseio incorreto também podem afetar negativamente o comportamento do gume.

A preparação do gume visa, portanto, remover material de forma controlada para ajustar a microtopografia e a microestrutura da região ativa da ferramenta, melhorando sua funcionalidade e aumentando a durabilidade durante o corte (RODRÍGUEZ, 2009; VENTURA et al., 2017; ZHOU et al., 2023).

O processo de preparação do gume, que inclui o arredondamento, gera uma superfície convexa conectando o flanco e a face da ferramenta, como ilustrado na Figura 4. Esse procedimento é crucial para melhorar o desempenho durante o corte e aumentar a durabilidade da ferramenta, pois a remoção controlada de microdefeitos e a suavização das transições geométricas reduzem concentrações de tensão e favorecem a adesão uniforme de revestimentos PVD/CVD aplicados posteriormente. Dessa forma, assegura-se um revestimento subsequente de melhor qualidade e maior resistência ao desgaste (DENKENA; LUCAS; BASSETT, 2011; BIERMANN; WOLF; AßMUTH, 2012).

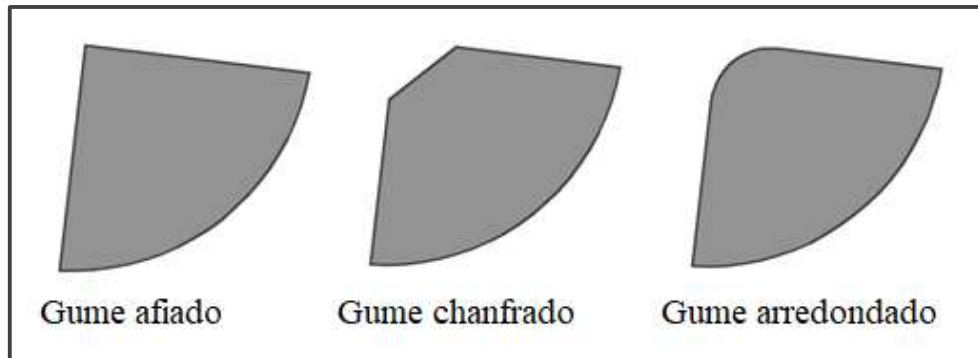
Figura 4 - Arredondamento do Gume.



Fonte: Adaptado de (RODRÍGUEZ, 2009).

Os principais tipos de preparação de gume utilizados em ferramentas de corte incluem três formas principais: arredondado, afiado e chanfrado, exemplificado na Figura 5. Além disso, também são comuns as combinações entre gumes chanfrados e arredondados, visando otimizar o desempenho de corte para diferentes aplicações. (RODRÍGUEZ, 2009; ZHOU et al., 2023).

Figura 5 - Principais geometrias de tratamento de gume.



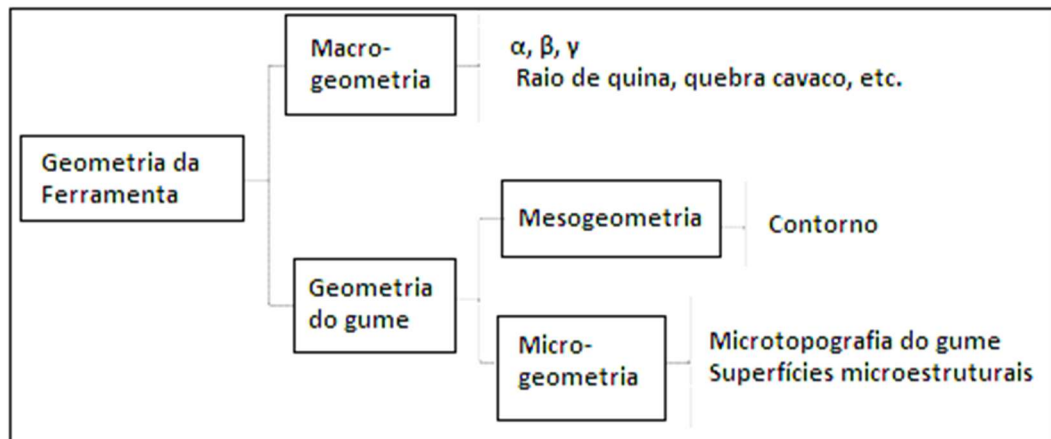
Fonte: Adaptado de (ZHOU et al., 2023).

Essas geometrias representam configurações amplamente empregadas na preparação de gumes e são utilizadas como base para compreender como diferentes tratamentos influenciam a interação com o material usinado e a evolução do desgaste durante o processo de usinagem.

### 2.3.1 Caracterização da geometria do gume

A geometria da ferramenta de corte pode ser classificada em macrogeometria e geometria do gume, conforme ilustrado na Figura 6. A macrogeometria é definida pelos elementos geométricos, como os ângulos de corte e raio de ponta, enquanto a geometria do gume se subdivide em mesogeometria e microgeometria. A mesogeometria descreve o contorno da superfície convexa resultante do arredondamento, ao passo que a microgeometria refere-se à microtopografia do gume e das superfícies adjacentes (RODRÍGUEZ, 2009).

Figura 6 - Aspectos da geometria da ferramenta.



Fonte: Adaptado de (RODRÍGUEZ, 2009).

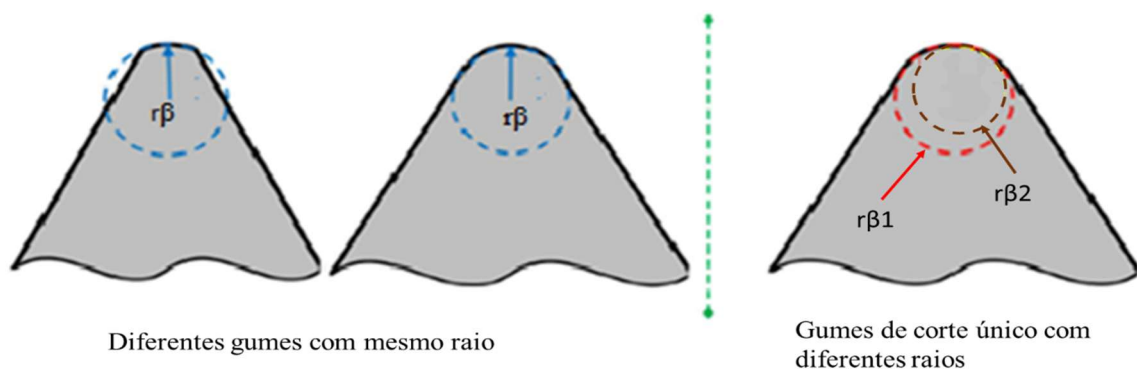
Essas categorias permitem a caracterização da preparação do gume por meio de parâmetros quantificáveis e tecnologia de medição apropriada, sendo crucial a caracterização dos contornos da superfície convexa gerada pelo processo de arredondamento (RECH, 2006; RODRÍGUEZ, 2009).

### 2.3.1.1 Mesogeometria do gume

A caracterização adequada do gume é fundamental, pois o arredondamento raramente assume a forma de um arco circunferencial perfeito. Em muitos casos, o raio apresenta irregularidades que dificultam a descrição por um valor único (RODRÍGUEZ, 2009; ZHOU et al., 2023)

Figura 7 mostra um exemplo de erro de caracterização quando se adota apenas um ponto de medição (ZHOU et al., 2023).

Figura 7 - Erro de caracterização causado pelo método de gume.

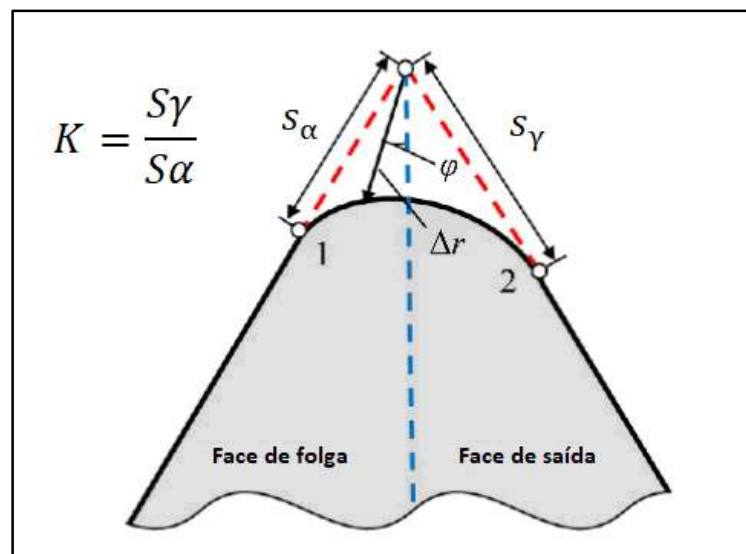


Fonte: Adaptado de (ZHOU et al., 2023)

Como enfatizado por Zhou et al. (2023), a correta caracterização do gume requer medições em múltiplos pontos e ajustes finos para descrever com precisão a forma e a estrutura do raio. Essa abordagem é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados experimentais e distinguir variações sutis na microgeometria do gume.

Denkena et al. (2011) introduziram o método de caracterização de fator de forma, ou fator K, para superar as limitações da caracterização de raio único. Este fator K é a razão entre  $S_\gamma$  e  $S_\alpha$ , onde  $S_\gamma$  e  $S_\alpha$  são as distâncias da ponta teórica até os pontos 1 e 2 de transição na face de saída e na face de folga, respectivamente. O valor de K indica a inclinação do arco do gume, sendo maior que 1 quando o gume inclina para a face de saída, menor que 1 quando inclina para a face de folga, e igual a 1 quando o gume é simétrico. A Figura 8 exemplifica um fator K maior que 1.

Figura 8 - Método de caracterização do fator de forma do gume.



Fonte: Fonte: Adaptado de (ZHOU et al., 2023).

O fator K permite uma caracterização mais precisa da mesogeometria, complementando a simples indicação do raio. Segundo Denkena et al. (2011), valores típicos de arredondamento situam-se na faixa de 20 a 100  $\mu\text{m}$ , faixa considerada adequada para equilibrar robustez do gume e eficiência de corte. Essa caracterização é especialmente importante porque o arredondamento influencia diretamente a distribuição de cargas termomecânicas no gume, o que impacta os mecanismos de desgaste e, conseqüentemente, a vida útil da ferramenta.

Estudos mais recentes, como os de Zhou et al. (2024), aprofundaram a análise térmica da preparação do gume, demonstrando por meio de simulações numéricas que variações sutis no raio influenciam significativamente o campo de temperatura e as tensões compressivas locais durante o corte. Esses resultados confirmam a relação direta entre a geometria do gume e os mecanismos de desgaste observados em ferramentas de metal duro, especialmente sob condições de furação contínua

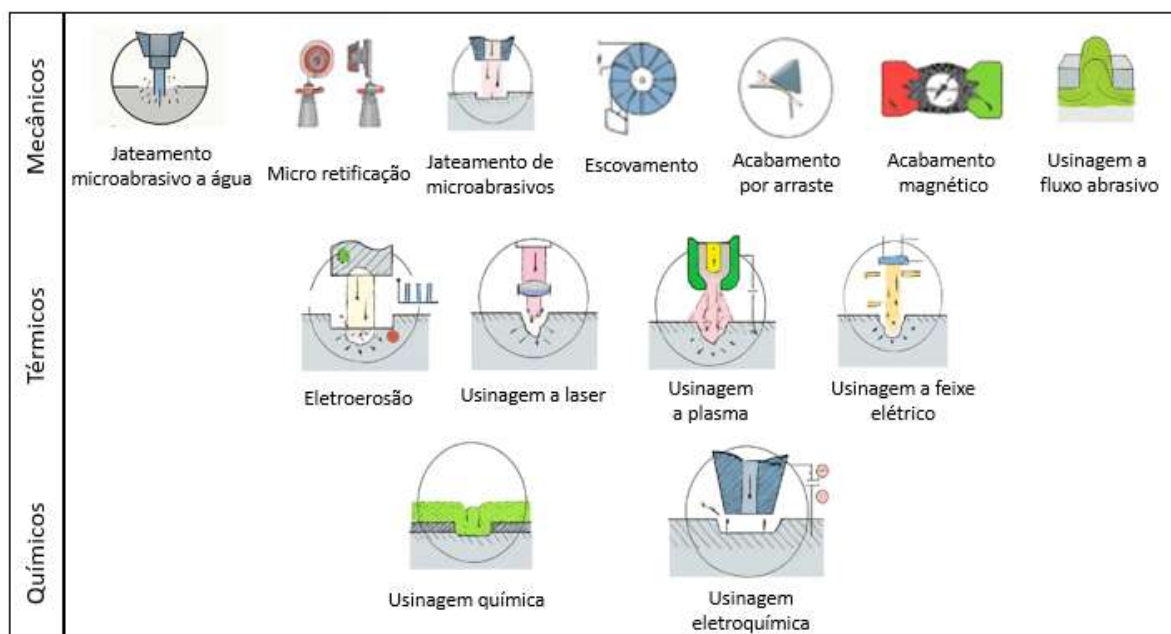
Além disso, Biermann et al. (2012) demonstraram que arredondamentos adequados podem aumentar as taxas de avanço na furação, reduzindo o tempo de usinagem e melhorando a eficiência geral do processo.

Complementarmente, Zhou e Wang (2011) analisaram numericamente a furação do aço 42CrMo com brocas de metal duro e observaram que o aumento do raio de gume eleva a temperatura local devido à maior área de contato, mas reduz a concentração de tensões e a taxa de desgaste inicial. Essa observação reforça que a definição adequada do gume é um fator de compromisso entre estabilidade térmica, resistência mecânica e eficiência de corte, em consonância com os estudos de (DENKENA; LUCAS; BASSETT, 2011; BASSETT; KÖHLER; DENKENA, 2012).

### **2.3.2 Tipos de processos de preparação do gume**

A preparação do gume é um aspecto crucial no desenvolvimento e manutenção de ferramentas de corte, englobando uma variedade de métodos que visam otimizar o desempenho e a durabilidade das ferramentas. Entre os principais métodos de preparação estão a escovação com filamentos abrasivos, microjateamento, polimento com pasta de diamante, acabamento por arraste, usinagem a jato de água, fluxo abrasivo e acabamento magnético (RODRÍGUEZ, 2009). Cada uma dessas técnicas utiliza uma fonte de energia distinta para a remoção de material e pode ser classificada em categorias mecânicas, térmicas e químicas, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Classificação dos processos de preparação de gume.



Fonte: Adaptado de (RODRÍGUEZ, 2009).

A revisão de Zhou et al. (2023) acrescenta uma perspectiva contemporânea sobre esses métodos, enfatizando a importância de ajustes precisos na microgeometria do gume para otimizar o desempenho da ferramenta em aplicações de alta precisão. Os autores demonstram que a seleção adequada do método de preparação reduz defeitos superficiais e melhora a qualidade do corte, ao mesmo tempo em que amplia a vida útil da ferramenta.

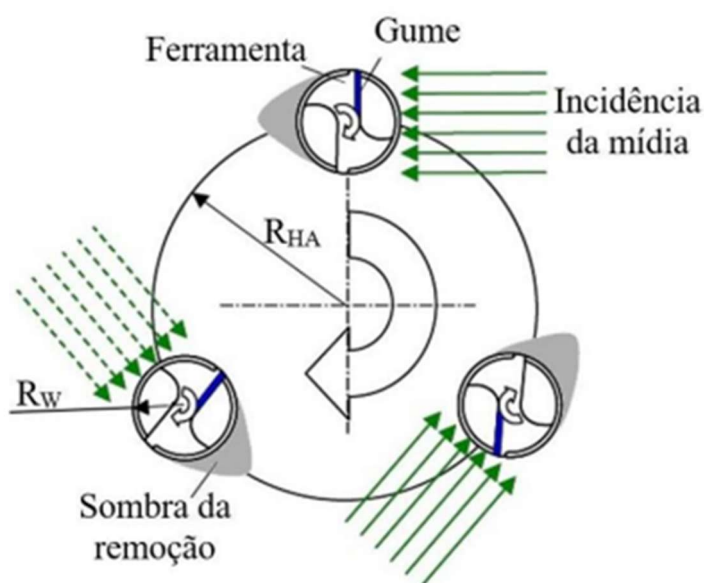
De forma geral, os processos de arraste, microjateamento e escovamento abrasivo destacam-se entre as técnicas mecânicas por sua capacidade de controlar o raio e o fator de forma (K) do gume com elevada reprodutibilidade (UHLMANN et al., 2021; LV et al., 2021; SLANINKOVA et al., 2023). Esses métodos combinam remoção controlada de material e suavização superficial, favorecendo a homogeneidade do gume e a estabilidade térmica durante a usinagem — aspectos essenciais para aplicações industriais de alto desempenho.

### 2.3.3 Tratamento por arraste

O processo de acabamento por arraste, também conhecido como drag finishing, envolve a imersão da ferramenta em um meio abrasivo composto por elementos cerâmicos de granulometrias específicas, selecionados conforme o arredondamento do gume ou o polimento desejado (LV et al., 2021).

Nesse método, utilizam-se máquinas com sistema planetário, no qual a ferramenta, fixada ao suporte, gira em torno de seu próprio eixo enquanto o equipamento promove movimento de translação no interior do meio abrasivo. Essa combinação de movimentos assegura tratamento uniforme em toda a periferia da ferramenta e maior homogeneidade na preparação do gume (OTEC, 2008; RISSE, 2006). A Figura 10 ilustra as direções e movimentos executados durante o processo de acabamento por arraste.

Figura 10 – Movimentos do processo por arraste.



$R_{HA}$ : Raio do planetário

$R_W$ : Raio da ferramenta

Fonte: Adaptado de (RISSE, 2006).

De acordo com Zhou et al. (2023), o tratamento por arraste proporciona elevada precisão na preparação do gume, aspecto essencial em aplicações que exigem estabilidade dimensional e desempenho consistente. Os autores destacam que o arraste é eficaz na obtenção de uma geometria de gume uniforme e no controle de características críticas da aresta, como o raio de arredondamento e a qualidade superficial resultante do processo. Esse método promove remoção de material de forma controlada e homogênea, reduzindo variações e imperfeições ao longo do gume e contribuindo para um desempenho mais estável da ferramenta.

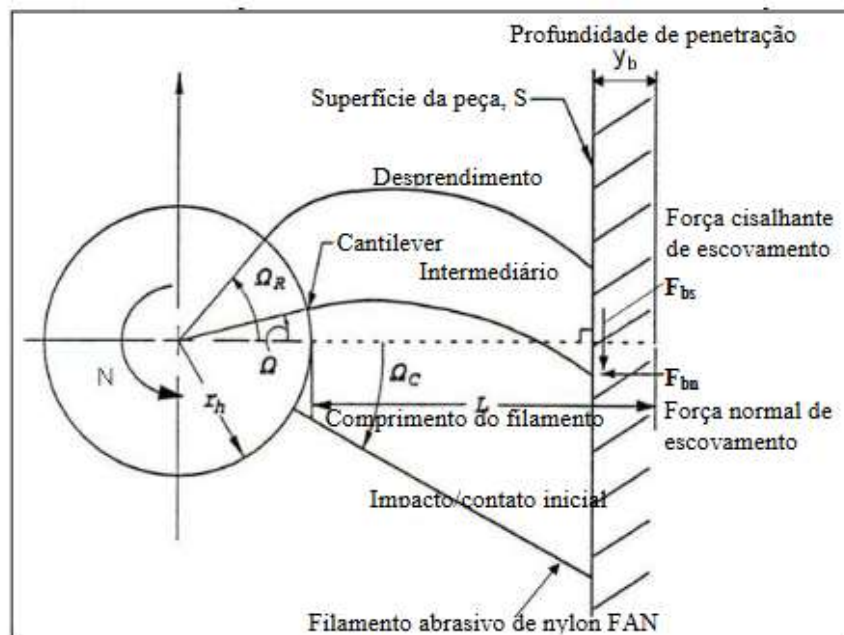
Além disso, Zhou et al. (2023), enfatizam que o uso de métodos avançados de arraste pode melhorar significativamente a qualidade da superfície de corte e prolongar a vida útil da ferramenta. As capacidades de ajuste fino e o controle sobre a geometria do gume proporcionados pelo arraste são fundamentais para atender às demandas de precisão e desempenho elevado na indústria de ferramentas de corte. Assim, o tratamento por arraste se

alinha com as tendências modernas de aprimoramento da preparação do gume, oferecendo uma solução eficiente para a criação de ferramentas de alta performance e durabilidade.

### 2.3.4 Tratamento por escovamento

O processo de escovamento com filamentos de nylon abrasivos (FNA) ilustrado na Figura 11 é empregado em situações que requerem raios específicos nos gumes e boa qualidade superficial. As escovas removem pequenas quantidades de material, e promovem uma melhoria do acabamento da superfície, contribuindo para um gume mais homogêneo e estável (RODRÍGUEZ, 2009).

Figura 11 - Escovamento com filamentos de nylon abrasivos.



Fonte: Adaptado de (RODRÍGUEZ, 2009).

Segundo Zhou et al. (2023), a escovação com filamentos abrasivos pode contribuir para a homogeneização do gume e para a redução de microdefeitos, desde que sejam aplicados parâmetros de pressão, velocidade e rigidez da escova devidamente controlados. Denkena et al. (2019) complementam que, em condições industriais, variações na rigidez dos filamentos, na carga aplicada ou no tempo de exposição podem gerar deformações irregulares no raio do gume, reduzindo a integridade superficial e a estabilidade do corte.

Dessa forma, a eficácia do escovamento está diretamente relacionada à sua parametrização. Em condições inadequadas, o processo pode produzir microdano, rebarbas residuais e irregularidades geométricas no raio do gume.

### **2.3.5 Tratamento por microjateamento**

O microjateamento é um processo amplamente utilizado para o acabamento final de ferramentas de corte revestidas, especialmente com filmes duros aplicados por Physical Vapor Deposition (PVD). O método consiste na projeção controlada de partículas abrasivas sobre a superfície do gume, promovendo a remoção de microdefeitos residuais e a indução de tensões compressivas, o que aumenta a integridade estrutural e a resistência ao desgaste (BOUZAKIS et al., 2011).

Estudos recentes confirmam que a microgeometria da ferramenta, resultante do microjateamento, exerce influência direta sobre a deformação plástica, geração de calor e vida útil da ferramenta. Em comparação com o jateamento a seco e o escovamento, o microjateamento úmido proporciona melhor acabamento superficial e maior repetibilidade geométrica do gume, desde que os parâmetros de pressão, tipo de abrasivo e tempo de exposição sejam rigorosamente controlados (SLANINKOVA et al., 2023; STRAKA; VOPAT, 2022).

Em síntese, o microjateamento apresenta elevado potencial para aumentar a durabilidade e a estabilidade dimensional do gume, sendo considerado um método eficiente de preparação quando aplicado de forma controlada e adaptada ao material e à geometria da ferramenta.

### **2.3.6 Efeitos do tratamento do gume sobre a vida útil da ferramenta**

A pesquisa nessa área tem se concentrado na caracterização e medição dos processos de preparação, de modo a garantir controle de qualidade e análise precisa de suas vantagens e limitações. De modo geral, o arredondamento dos gumes apresenta melhores resultados em termos de vida útil da ferramenta, quando comparado a gumes afiados ou com microdefeitos (ZHAO et al., 2017).

Santana (2015) investigou dois tipos de preparação em brocas helicoidais: gumes arredondados, obtidos por escovamento manual, e gumes chanfrados, realizados por limagem manual. O estudo foi conduzido na furação de aço temperado e revenido, e demonstrou que a modificação do gume impacta diretamente a eficiência e a qualidade do processo de furação. Ainda que não tenha apresentado valores numéricos de raio, o autor reforça a importância da preparação adequada do gume e as dificuldades de caracterização precisa em ferramentas rotativas.

Barbosa (2021) avaliou o acabamento por arraste em ferramentas de fresamento aplicadas ao aço VP20TS. Foram testados raios de arredondamento de 0,01 mm e 0,03 mm, observando-se aumento da vida útil e melhora no acabamento superficial. Esse trabalho reforça a relevância do controle preciso de parâmetros geométricos obtidos pelos processos de preparação.

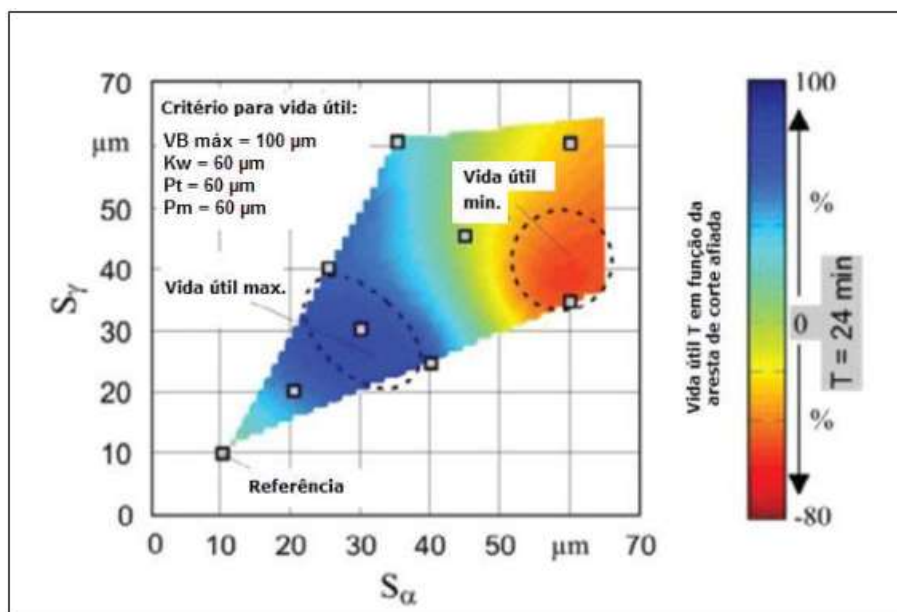
Esses estudos demonstram a importância da preparação dos gumes de corte não apenas para a durabilidade das ferramentas, mas também para a qualidade dos processos de usinagem. A compreensão detalhada das técnicas e seus efeitos permite a seleção de métodos mais adequados para cada aplicação, garantindo resultados superiores em termos de desempenho e eficiência das ferramentas de corte. Zhao et al., (2017) destacam que a modificação adequada do gume pode aumentar a vida útil da ferramenta em até 300%, dependendo do material e das condições de usinagem

Em relação à mesogeometria do gume, dois parâmetros se destacam: o raio de arredondamento, normalmente situado entre 20 e 100  $\mu\text{m}$  (DENKENA; LUCAS; BASSETT, 2011), e o fator de forma  $K$ , que descreve a simetria do arco formado entre as faces de saída e de folga. O raio influencia diretamente a robustez do gume e a dissipação de calor, enquanto o fator  $K$  define se o arredondamento é simétrico ( $K \approx 1$ ) ou inclinado para uma das faces ( $K > 1$  ou  $K < 1$ ).

Além disso, a preparação do gume com fator  $K \approx 1$  (simétrico) é amplamente reconhecida como a condição que proporciona maior equilíbrio entre robustez e eficiência de corte. Denkena, Lucas e Bassett (2011) demonstraram que essa configuração distribui de forma mais uniforme as cargas termomecânicas no gume, resultando em desgaste controlado tanto na face de saída quanto no flanco da ferramenta. Da mesma forma, arredondamentos na faixa de 20 a 100  $\mu\text{m}$  são relatados como adequados para prolongar a vida útil da ferramenta, oferecendo confiabilidade e consistência no desempenho (DENKENA; LUCAS; BASSETT, 2011; DENKENA; GROVE; MAISS, 2015; MUTHUSWAMY; ANDRODU, 2020).

Nesse contexto, Muthuswamy e Androdu (2020) investigaram o efeito do fator  $K$  na usinagem do aço AISI 4140. Os autores aplicaram gumes preparados com valores de  $K \geq 1$  e verificaram que arredondamentos assimétricos podem trazer vantagens iniciais, como menores forças de avanço e de penetração. Em contrapartida, Denkena, Lucas e Bassett (2011) demonstraram que uma preparação simétrica ( $K \approx 1$ ) resulta em maior vida útil a longo prazo, proporcionando melhor equilíbrio entre robustez e eficiência de corte, Figura 12.

Figura 12 - Vida útil da ferramenta em função da relação fator K.



Fonte: Adaptado de (DENKENA; LUCAS; BASSETT, 2011)

Esses O autores também concluíram que a região de máxima durabilidade ocorre quando  $S_\alpha \approx S_\gamma = 30 \pm 5 \mu\text{m}$ , tanto para  $K > 1$  quanto para  $K < 1$ , ainda que os mecanismos de desgaste predominantes variem: desgaste na face de saída para  $K < 1$  e desgaste de flanco para  $K > 1$ .

Apesar dos avanços, a literatura sobre brocas de ponta intercambiável ainda é escassa. Mikloš et al. (2019), por exemplo, estudaram esse tipo de ferramenta na usinagem de aço para rolamentos e observaram múltiplas deformações na cunha de corte, frequentemente resultando em desgaste acelerado e falhas prematuras. Além disso, os autores como Denkena (2011) e Zhou et al. (2023) ressaltam que a caracterização do gume em ferramentas rotativas é particularmente desafiadora, reforçando a necessidade de investigações experimentais específicas nesse campo.

Em síntese, a literatura mostra que o arredondamento do gume, especialmente na faixa de 20–100 μm, aliado a preparações simétricas ( $K \approx 1$ ), está associado a maior estabilidade e vida útil em usinagem de aços (DENKENA; LUCAS; BASSETT, 2011; DENKENA; GROVE; MAISS, 2015; MAISS; GROVE; DENKENA, 2017; VOPAT et al., 2017; MUTHUSWAMY; ANDRODU, 2020). Entretanto, observa-se escassez de estudos aplicados a brocas de ponta intercambiável, cuja caracterização geométrica e comportamento em corte apresentam desafios adicionais. Dessa forma, torna-se relevante investigar experimentalmente como diferentes

preparações de gume influenciam a vida útil dessas ferramentas, contribuindo para preencher a lacuna existente e apoiar aplicações industriais (MIKLOŠ et al., 2019).

### 2.3.7 Trabalhos correlatos e lacunas da literatura

Estudos recentes têm investigado de forma sistemática a influência da preparação do gume no desempenho e na vida útil de ferramentas de corte, destacando a importância do controle da microgeometria e da integridade superficial após processos de retificação ou reafiação. Revisões contemporâneas apontam que métodos como microjateamento, arraste e escovamento abrasivo apresentam potencial para reduzir microdefeitos, controlar o raio de gume e melhorar a estabilidade do desgaste, desde que devidamente parametrizados (ZHOU et al., 2023; STRAKA; VOPAT, 2022)

Do ponto de vista metodológico, os trabalhos correlatos normalmente combinam: (i) caracterização geométrica do gume, por meio da medição do raio e/ou do fator de forma K; (ii) ensaios experimentais em condições controladas de usinagem; (iii) monitoramento do desgaste, frequentemente por VB ou VBmax; e (iv) análise dos mecanismos predominantes de desgaste. Denkena, Lucas e Bassett (2011) demonstraram que a distribuição de tensões no gume está diretamente associada à sua microgeometria, enquanto estudos mais recentes reforçam que pequenas variações no raio e na simetria do gume podem alterar significativamente o comportamento térmico e mecânico durante o corte.

Em aplicações específicas, Barbosa (2021) verificou aumento da vida útil em ferramentas submetidas ao tratamento por arraste, associando os resultados ao controle mais uniforme do raio de arredondamento. Santana (2015) destacou que a modificação do gume em brocas helicoidais influencia diretamente a estabilidade do processo de furação, ainda que com limitações quanto à caracterização geométrica precisa. Trabalhos como os de Muthuswamy e Androudu (2020) investigaram o efeito do fator K na usinagem de aços ligados, evidenciando que diferentes configurações geométricas produzem comportamentos distintos de desgaste.

Apesar desses avanços, observa-se que a maioria dos estudos concentra-se em ferramentas novas ou em operações distintas da furação com brocas de ponta intercambiável reafiadas. São limitadas as investigações que avaliam comparativamente diferentes métodos de preparação do gume após reafiação, especialmente em aplicações industriais envolvendo aços de médio carbono e monitoramento sistemático do VBmax ao longo do processo.

Dessa forma, identifica-se uma lacuna quanto à compreensão do efeito combinado entre reafiação, método de preparação do gume e evolução do desgaste em brocas de ponta

intercambiável. O presente estudo busca contribuir para o preenchimento dessa lacuna ao avaliar experimentalmente os tratamentos por arraste, escovamento e microjateamento, correlacionando microgeometria, mecanismos de desgaste e vida útil na furação do aço SAE 1030.

## 2.4 USINABILIDADE

A usinabilidade é uma grandeza tecnológica de natureza comparativa, que expressa o comportamento de um material durante o processo de corte em relação a um material de referência (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Em termos práticos, representa o grau de facilidade ou dificuldade de usinar um material, considerando critérios como vida útil da ferramenta, qualidade do acabamento superficial, esforços de corte, temperatura gerada e formação de cavacos.

Embora não exista uma equação universal para sua determinação, a usinabilidade pode ser quantificada por índices comparativos obtidos experimentalmente. Um dos mais utilizados é o coeficiente de usinabilidade, definido como a razão entre a velocidade de corte de um material e a velocidade de corte do material-padrão, multiplicada por cem.

Neste trabalho, a usinabilidade é abordada de forma indireta, a partir da análise comparativa do desgaste e do desempenho das ferramentas submetidas a diferentes preparações de gume durante a furação do aço SAE 1030.

Diversos fatores influenciam a usinabilidade de um material, dividindo-se em intrínsecos e extrínsecos. Fatores intrínsecos incluem estado metalúrgico, dureza, propriedades mecânicas anteriores, composição química e operações que podem causar encruamento. Propriedades como dureza, resistência, ductilidade, condutividade térmica e taxas de encruamento têm um impacto significativo na usinabilidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; KÖNIG; KLOCKE, 1997). Entre os fatores extrínsecos, destacam-se as condições de usinagem, características da ferramenta, condições de refrigeração e dificuldades do sistema de fixação, que também desempenham um papel crucial. Assim, a usinabilidade de um material pode variar significativamente dependendo das condições específicas de usinagem utilizadas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Embora a dureza e a resistência mecânica estejam frequentemente associadas à usinabilidade, essa visão é simplista. Outros fatores como a quantidade de inclusões e aditivos, a presença de partículas duras, a microestrutura e a tendência do material ao empastamento do

cavaco na superfície de saída da ferramenta também influenciam a usinabilidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

## 2.5 DESGASTE DAS BROCAS

Mesmo que a ferramenta de corte possua a tenacidade necessária para resistir a danos catastróficos, ela está sujeita ao desgaste progressivo durante o uso. Esse desgaste ocorre tanto na superfície de folga quanto na de saída, afetando diretamente sua eficiência e vida útil (ASTAKHOV, 2024; MACHADO et al., 2015). O desgaste pode ser definido como a perda gradual de material na ferramenta em função da interação mecânica, térmica e química com a peça e os cavacos (ASTAKHOV, 2024; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Desgaste Frontal ou de Flanco (VB, VBmax), ocorre na superfície de folga da ferramenta, resultante do contato entre a ferramenta e a peça durante o processo de usinagem (ASTAKHOV, 2024; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). O desgaste médio (VB) e máximo (VBmax) nos flancos de uma broca podem ser medidos com microscópio de até 50 vezes de aumento. Mesmo com deformação ou desgaste do gume, a marca de desgaste deve ser medida em relação à posição original do gume, utilizando uma referência. (CASTILHO, 2005).

Desgaste de cratera (KM), esse desgaste ocorre na superfície de saída da ferramenta, originado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. O desgaste KM é a distância entre o centro da cratera e o gume (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Desgaste do gume transversal de corte (Ct, Cm) - Uma das regiões mais críticas da broca é a área do gume transversal, onde os danos começam desde o primeiro contato com o material a ser usinado. As intensas demandas mecânicas, combinadas com velocidades de corte próximas a zero nesse ponto, resultam em um desgaste progressivo devido ao esmagamento do material. Essas tensões podem levar ao lascamento e subsequente deterioração do gume transversal, potencialmente resultando em caldeamento da ferramenta e sua quebra (CASTILHO, 2005).

Desgaste de quina (W) - Nos gumes, as solicitações térmicas são predominantes devido à alta velocidade de corte, ao corte dos gumes principais e ao calor gerado pelo atrito dos cavacos contra a superfície de saída, além do atrito das guias da ferramenta contra a parede do furo (Schroeter et al., 1999; Cardoso, 2014).

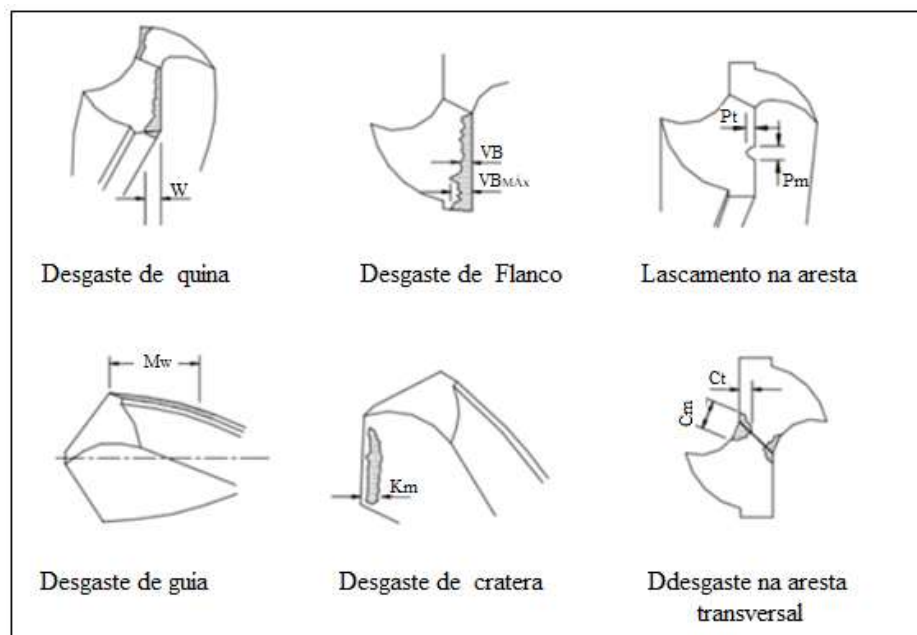
Desgaste de guia (Mw) - Resulta do atrito contínuo entre a guia da ferramenta e a parede do furo durante o processo de usinagem. Esse desgaste é crucial, pois afeta diretamente a

precisão dimensional e a qualidade superficial das peças usinadas. (ASTAKHOV, 2024; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

O lascamento do gume principal e do gume transversal de corte (Pt, Pm) - Este tipo de avaria ocorre quando há a remoção de uma grande partícula de uma só vez (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Pt refere-se à altura do lascamento, enquanto Pm representa a largura do mesmo (CASTILHO, 2005).

Conforme Castilho (2005), os desgastes das brocas podem ser medidos, e a Figura 13 mostra os locais estabelecidos para esse controle.

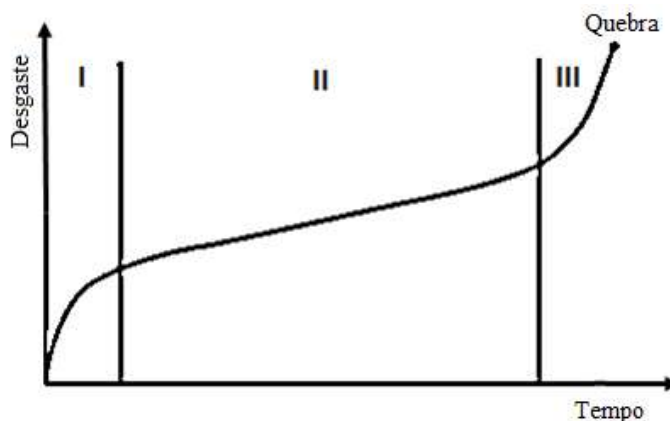
Figura 13 - Locais para medições dos desgastes em brocas.



Fonte: Adaptado de (CASTILHO, 2005).

Durante a usinagem, a ferramenta segue uma curva típica em três estágios (MACHADO et al., 2015): desgaste inicial acelerado, devido ao ajuste do gume; desgaste regular, com taxa aproximadamente linear; e desgaste acelerado, levando a falha da ferramenta (Figura 14).

Figura 14 - Comportamento típico da curva de desgaste.



Fonte: Adaptado de (MACHADO et al., 2015).

Identificar o início do terceiro estágio é essencial para substituir a ferramenta em tempo hábil, evitando falhas catastróficas e mantendo a qualidade e produtividade (MACHADO et al., 2015).

Segundo a norma ISO 3685 (1993) e referências clássicas em usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; MACHADO et al., 2015; ASTAKHOV, 2024), o critério de fim de vida da ferramenta é geralmente estabelecido pelo desgaste de flanco máximo (VBmax), adotando-se valores entre 0,3 mm e 0,6 mm, sendo 0,5 mm o mais utilizado em ensaios experimentais. No entanto, fabricantes de brocas de ponta intercambiável costumam recomendar limites mais conservadores, na faixa de 0,2 a 0,3 mm, devido às particularidades construtivas e às exigências de precisão dimensional desse tipo de ferramenta.

Assim, o monitoramento do VBmax representa a forma mais prática e amplamente aceita de avaliação da vida útil de ferramentas, permitindo comparações entre diferentes estudos e aplicações. A compreensão dos mecanismos de desgaste, por sua vez, é fundamental para correlacionar o comportamento observado entre as diferentes condições de preparação do gume analisadas neste trabalho.

A compreensão das diferentes geometrias de preparação do gume é essencial porque cada configuração tende a interagir de maneira distinta com o material usinado. Essas interações influenciam diretamente os mecanismos de desgaste que se desenvolvem durante a furação. Assim, antes de analisar os resultados experimentais, torna-se necessário apresentar os principais tipos de desgaste que podem ocorrer em brocas, bem como seus efeitos sobre o desempenho e a vida útil da ferramenta.

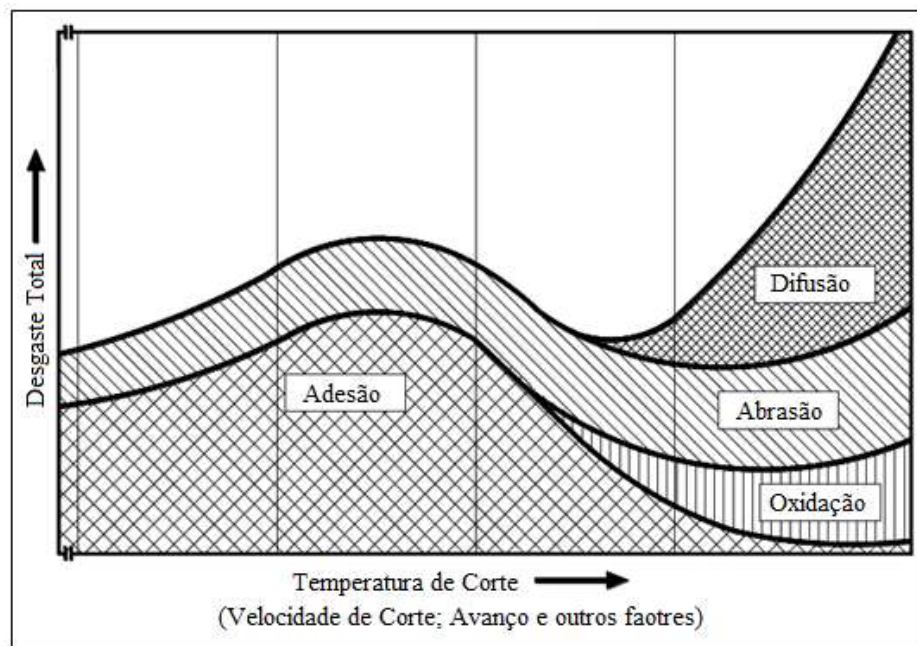
### 2.5.1 Mecanismos de desgaste

Diversos fenômenos são responsáveis pelo desgaste das ferramentas, e todas as formas de desgaste ocorrem simultaneamente, embora uma delas geralmente predomine (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; MACHADO et al., 2015).

De acordo com Machado et al. (2015), os mecanismos de abrasão, adesão, difusão e oxidação variam conforme a temperatura de corte, influenciados pela velocidade de corte e outros parâmetros relevantes.

Segundo König e Klocke (1997), existe uma relação clara entre os mecanismos de desgaste e a temperatura de corte, com mostrado na Figura 15. Em temperaturas baixas, os mecanismos de abrasão e adesão predominam. À medida que a temperatura aumenta, o mecanismo de adesão diminui, dando lugar aos mecanismos de difusão e oxidação. A difusão, em particular, apresenta um crescimento exponencial com o aumento da temperatura

Figura 15 - Mecanismos de desgastes em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de (MACHADO et al., 2015)

Abrasão mecânica é um mecanismo de desgaste que ocorre nas superfícies de folga e de saída da ferramenta devido ao atrito com a peça e o cavaco, respectivamente. O desgaste por abrasão aumenta com a dureza do material da peça e a temperatura de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

A adesão, resulta do contato entre superfícies sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, formando um filme metálico. Esse fenômeno pode

ocorrer na formação da aresta postiça, onde uma camada de cavaco se adere à superfície de saída da ferramenta. Essa camada de cavaco pode atuar como a aresta de corte da ferramenta, afetando as forças de corte, o acabamento superficial da peça e o desgaste da ferramenta. Durante a usinagem, o desprendimento dessa camada de cavaco pode resultar na quebra da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

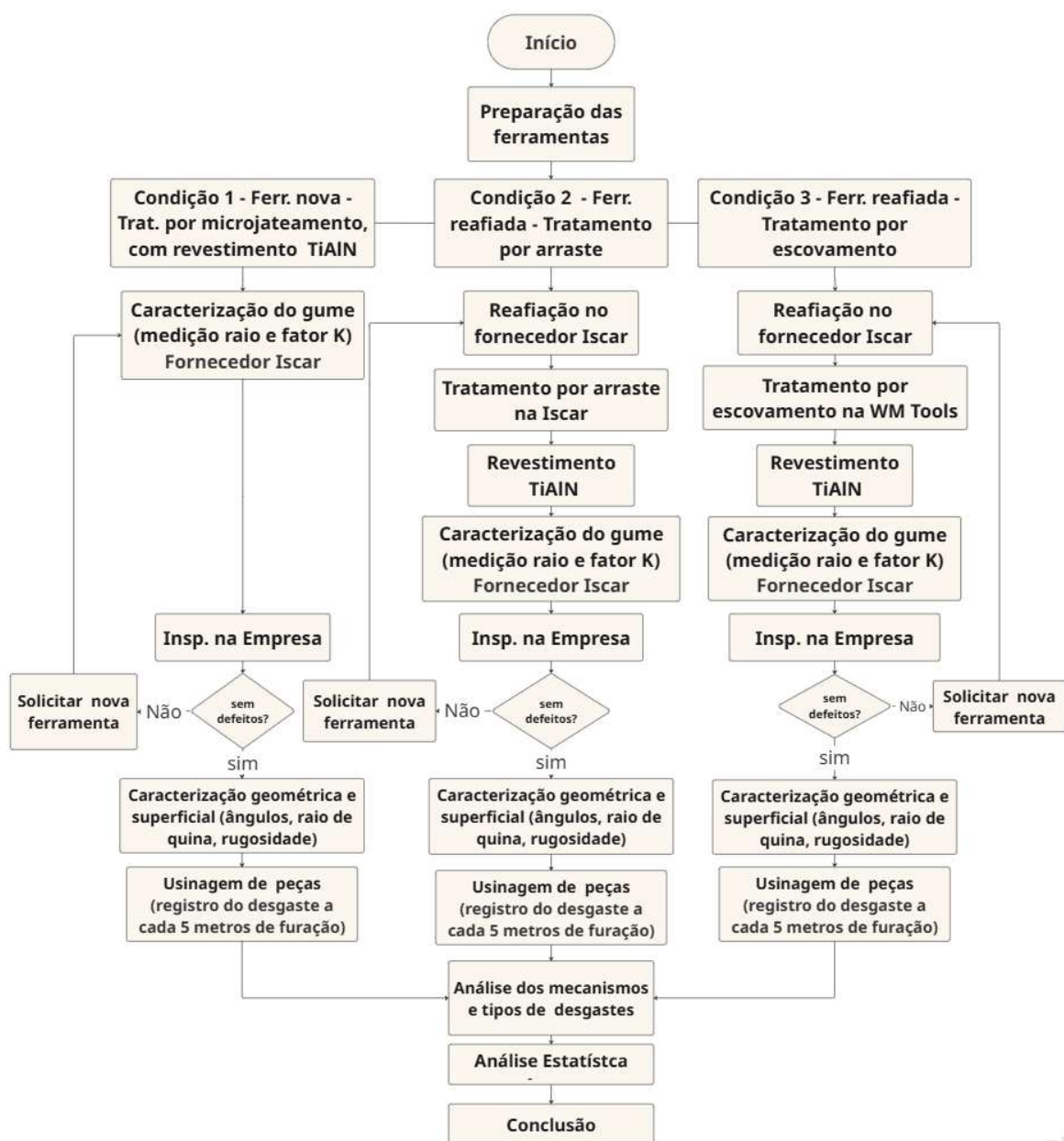
A difusão, dependente da temperatura e da afinidade físico-química entre os materiais envolvidos, a difusão ocorre microscopicamente na região de corte, envolvendo a transferência de átomos da peça para a ferramenta. Isso altera as condições de equilíbrio químico do material da ferramenta e suas propriedades (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

A oxidação, é o tipo mecanismo que ocorre nas extremidades do contato entre cavaco e ferramenta, devido à presença significativa de ar e à exposição a fluidos de corte contendo ar e água (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para avaliar a influência dos tratamentos de gume na vida útil de brocas de ponta intercambiável durante a furação do aço 1030. São descritos o material dos corpos de prova, a máquina-ferramenta, as características das brocas, as condições de usinagem e o critério de desgaste utilizado. A Figura 16 sintetiza as etapas experimentais, e orienta as a organização das seções seguintes

Figura 16 – Fluxograma geral das etapas.



O fluxograma apresentado sintetiza a estratégia experimental adotada neste estudo, evidenciando a sequência lógica das etapas desde a preparação e caracterização geométrica das ferramentas até a realização dos ensaios de furação e análise dos resultados. Após a aplicação dos diferentes tratamentos de gume, procedeu-se à caracterização da microgeometria, seguida dos ensaios experimentais com monitoramento do desgaste ao longo da usinagem. Por fim, os dados obtidos foram analisados quanto aos mecanismos de desgaste e submetidos à Análise de Variância (ANOVA), assegurando coerência metodológica e comparabilidade entre as condições avaliadas.

### 3.1 CORPO-DE-PROVA (MATERIAL)

Os experimentos foram realizados com um aço fundido equivalente ao SAE 1030, classificado como médio carbono. O material foi fornecido pela própria empresa, e suas propriedades atenderam às especificações do cliente, conforme os limites mínimos e máximos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Propriedades do aço fundido (equivalente ao SAE 1030).

	Escala	Limite Mínimo	Limite Máximo
Dureza Núcleo	HB	165	195
Resistencia a tração	N/mm <sup>2</sup>	>560	-
Limite de escoamento	N/mm <sup>2</sup>	>350	-
Alongamento	5%	>22	-
Matriz	Ferrita e Perlita		

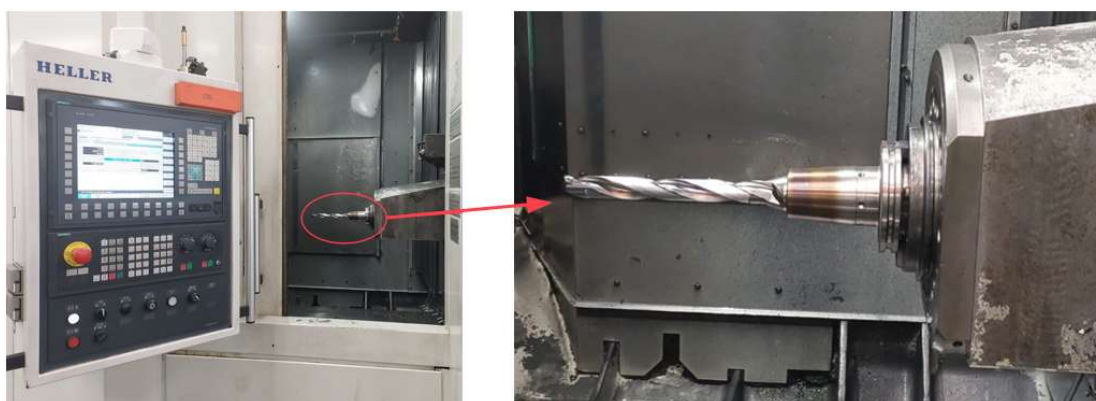
Fonte: Riosulense (2025).

As propriedades apresentadas situam o material dentro da faixa típica de aços de médio carbono conforme os limites estabelecidos pelo cliente. A definição desses parâmetros é importante para a caracterização do material utilizado nos ensaios, garantindo que as condições experimentais reflitam o comportamento esperado para essa classe de aço. Essas informações servem como referência para a reprodução dos testes e para a comparação com estudos que utilizem materiais de especificação semelhante.

### 3.2 MÁQUINA FERRAMENTA

A usinagem foi realizada em um centro de usinagem horizontal Heller MCH-350 (Heller), equipado com comando Siemens Sinumerik 840D. A máquina possui três eixos (X, Y, Z) e duas mesas de trabalho independente para carga e descarga manual de peças. O magazine de ferramentas comporta 80 posições, com interface de fixação SK 50 DIN 69871 (Figura 17). O eixo-árvore atinge até 8000 rpm.

Figura 17 – Sistema de fixação da broca.



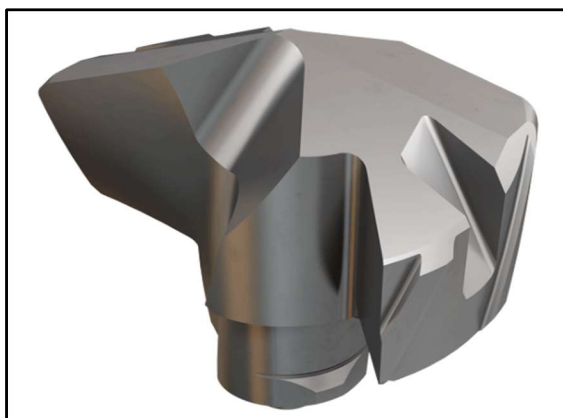
Fonte: O autor (2025).

Durante os ensaios, foi utilizado fluido lubri-refrigerante do tipo semi-sintético, fornecido pela ALL Lubrificantes, denominado ALL PS 100 SS (ANEXO A) com concentração mantida em 10%, dentro da faixa operacional recomendada de 9 – 12%. O valor foi monitorado por refratômetro. A pressão do fluido foi mantida em 40 bar.

### 3.3 FERRAMENTA DE CORTE

As ferramentas utilizadas nos ensaios foram brocas de ponta intercambiável do modelo ISCAR, com denominação ICP 068-2M IC908, com diâmetro de 6,8 mm, ângulo de ponta de 140° e dupla guia para estabilidade e redução de desvios durante a furação (Figura 18). O substrato é composto por metal duro submicrométrico, classe ISO P15–P30, revestido por TiAlN via PVD (Physical Vapor Deposition), indicado para operações de furação em aços de médio carbono.

Figura 18 – Ponta ICP 068 com dupla guia.



Fonte: ISCAR (2025).

O ângulo de ponta é de  $140^\circ$  e esse ponta possui dupla guia para redução de desvios e melhoria da precisão dimensional e do acabamento superficial.

Foram avaliadas três condições distintas de ponta, conforme descrito a seguir:

1. Condição 1 - Nova: ponta original de fábrica tratada por microjateamento e revestida com TiAlN;
2. Condição 2 - Reafiada + Arraste: ponta reafiada, tratada por arraste e posteriormente revestida com TiAlN;
3. Condição 3 - Reafiada + Escovamento: ponta reafiada, tratada por escovamento na empresa WM Tools e posteriormente revestida com TiAlN.

A reconstituição geométrica das pontas reafiadas (condições 2 e 3) foi realizada pela empresa Iscar em São Paulo, mantendo o mesmo ângulo de ponta e ângulo de cunha nominal da condição nova, assegurando a comparabilidade entre os ensaios.

Após o condicionamento, todas as pontas foram inspecionadas visualmente sob microscópio digital Dino-Lite ( $70\times$ ), instalado na empresa Riosulense, conforme mostrado na Figura 19, a fim de verificar a integridade do gume e a ausência de lascamentos ou microdefeitos decorrentes do manuseio e transporte.

Figura 19 - Microscópio Dino Lite.



Fonte: O autor (2025).

As pontas da condição 3(escovamento), após o condicionamento, foram submetidas ao processo de tratamento do gume na empresa WM Tools, em Caxias do Sul, sob acompanhamento do mestrando, em seguida, foram enviadas à Iscar (São Paulo) para aplicação do revestimento TiAlN e medição do raio do gume.

As medições dos ângulos de ponta e do raio de quina foram realizadas em um equipamento de pré-ajuste e medição Zoller Smile 400, instalado na empresa Riosulense, utilizando o sistema óptico do equipamento, com precisão de 0,001 mm (Figura 20).

Figura 20 – Equipamento Zoller Smile 400.



Fonte: O autor (2025).

As pontas foram fixadas em um corpo de aço de aproximadamente 92 mm de comprimento, com canais helicoidais e orifícios para refrigeração interna, descrito pelo fabricante como DCN 065-033-12A-5D (Figura 21). A montagem foi realizada em mandril térmico, garantindo batimento máximo de 0,01 mm na ponta da broca. Esse procedimento assegurou a repetibilidade geométrica entre as pontas, eliminando a influência de desalinhamento ou vibração durante os ensaios de furação.

Figura 21 - Broca DCN com a ponta ICP montada.



Fonte: ISCAR (2025).

Os registros fotográficos e valores geométricos obtidos serviram de base para a análise comparativa apresentada no Capítulo 4, onde são discutidas as diferenças entre as condições avaliadas quanto às características geométricas e à integridade do gume.

### 3.3.1 Medição de rugosidade

Para complementar a caracterização das ferramentas, foram realizadas medições de rugosidade na face de folga da ferramenta após os tratamentos aplicados ao gume. As medições seguiram os parâmetros Ra e Rz, utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest SJ-310 (Figura 22).

Figura 22 - Rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest SJ-310



Fonte: O autor (2025).

As medições foram realizadas com cut-off  $\lambda_c = 0,8$  mm e comprimento de avaliação N2, seleção necessária devido à limitação geométrica da área disponível para medição na face de folga, uma vez que as pontas de broca intercambiável possuem diâmetro de 6,8 mm. Assim, o comprimento padrão de avaliação (N3) não poderia ser utilizado sem risco de extrapolar a região plana mensurável da superfície.

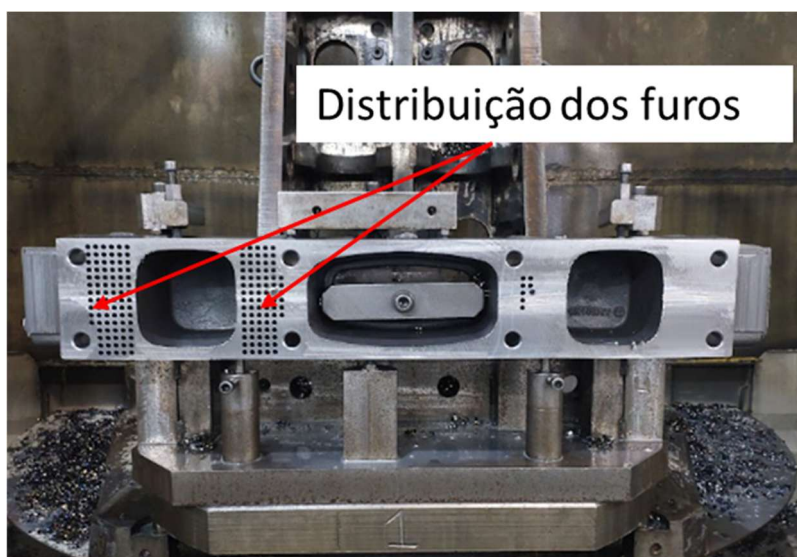
Para cada condição experimental, foram realizadas três medições independentes na região de folga da ponta intercambiável. A partir dos valores obtidos, calcularam-se a média aritmética e o desvio padrão amostral, permitindo avaliar a dispersão dos resultados e a repetibilidade das medições.

Os valores obtidos foram empregados na comparação da rugosidade entre as três condições avaliadas, auxiliando na análise dos mecanismos de desgaste apresentados no Capítulo 4.

### 3.4 PROCESSO DE USINAGEM E AVALIAÇÃO DO DESGASTE

A empresa disponibilizou material suficiente para a execução de 30 metros de furação por condição experimental, com duas réplicas planejadas para cada tratamento do gume. Ao final dos ensaios, mantiveram-se duas réplicas válidas para as condições nova e reafiada com arraste. Na condição reafiada com escovamento, uma das réplicas apresentou falha prematura, resultando em apenas uma réplica válida para análise métrica, embora ambas tenham sido utilizadas para registro das evidências microscópicas. O material utilizado como corpo de prova é apresentado na Figura 23, no qual foram distribuídos os furos do ensaio.

Figura 23 - Corpo de prova utilizado nos ensaios.



Fonte: O autor (2025).

O desgaste de flanco máximo ( $VB_{max}$ ) foi monitorado a cada 5 metros de furação, permitindo acompanhar a evolução contínua do desgaste ao longo dos 30 metros usinados. O ensaio foi conduzido até o limite máximo de 30 m de furação, definido como critério de fim de teste, e não com base em um valor limite de  $VB_{max}$ . Esse procedimento está alinhado com práticas normatizadas de ensaios de desgaste de ferramentas, nas quais o ensaio pode ser interrompido por um critério experimental previamente definido, especialmente em estudos comparativos entre condições de preparação de gume.

Foram adotados três marcos principais de referência:

- 5 m – estágio inicial;
- 15 m – estágio intermediário;
- 30 m – estágio final e limite máximo permitido pelo volume de material disponível.

Essa estratégia garantiu rastreabilidade da evolução do desgaste ao longo de todo o ensaio e consistência entre as condições experimentais.

As condições de corte foram mantidas constantes para todas as preparações de gume, permitindo isolar o efeito específico de cada tratamento. Os valores de velocidade de corte, avanço por rotação e profundidade de furo foram definidos com base nas recomendações do fabricante (Iscar) para o aço de médio carbono e confirmados em testes preliminares na empresa. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios.

Tabela 2 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Velocidade de corte	Vc	120 m/min
Avanço por rotação	f	0,22 mm/rot
Profundidade de furação	L	30 mm
Comprimento total usinado por condição	-	30 m

Fonte: O autor (2025).

Além da mensuração de VBmax, foram realizadas análises microscópicas ópticas nos mesmos intervalos de monitoramento, com o objetivo de identificar os mecanismos predominantes de desgaste e possíveis descontinuidades no gume. Essas observações complementam os resultados numéricos e fundamentam a discussão apresentada no Capítulo 4 deste trabalho.

### 3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS COM ANOVA

Para avaliar a influência dos tratamentos de preparação do gume sobre o desgaste de flanco das ferramentas, os resultados experimentais foram submetidos a uma Análise de Variância (ANOVA) de um fator. Esse procedimento estatístico permite verificar se as diferenças observadas entre os grupos avaliados são estatisticamente significativas ou se podem ser atribuídas à variabilidade experimental.

Neste estudo, a ANOVA considerou apenas duas condições, pois somente elas apresentaram duas réplicas válidas ao final dos 30 metros de furação:

- Ferramenta nova tratada por microjateamento
- Ferramenta reafiada tratada por arraste

A condição reafiada tratada por escovamento não foi incluída na análise devido à falha prematura de uma das réplicas, o que inviabilizou sua comparação estatística dentro da mesma base experimental.

O fator avaliado na ANOVA foi o tratamento do gume, com dois níveis: microjateamento e arraste. Os parâmetros geométricos raio de arredondamento ( $\approx 0,04$  mm) e fator K ( $\approx 1$ ) não foram incluídos como fatores estatísticos, pois foram mantidos constantes em todas as condições, desempenhando função de controle experimental para isolar o efeito dos tratamentos

de superfície. A Tabela 3 apresenta o fator considerado na análise estatística e as variáveis mantidas sob controle experimental.

Tabela 3 - Fator e níveis utilizados na análise.

Fator	Nível 1	Nível 2
Tratamento do Gume	Microjateamento	Arraste
Raio de Arredondamento (controle)	≈0,04mm	≈0,04mm
Fator K (controle)	≈1	≈1

Fonte: O autor (2025).

A variável de resposta considerada na ANOVA foi o valor final de VBmax ao término dos 30 metros de furação. A análise estatística baseou-se nos valores individuais obtidos para cada réplica válida, preservando a variabilidade experimental necessária à aplicação do método.

A análise estatística foi conduzida no Microsoft Excel, utilizando o suplemento Ferramentas de Análise de Dados, com nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ). Os resultados detalhados e sua interpretação são apresentados no Capítulo 4.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de furação envolvendo as três condições de ferramenta estudadas: ferramenta nova tratada por microjateamento e ferramentas reafiadas tratadas por arraste e por escovamento. Os resultados incluem a caracterização geométrica, a análise da evolução do desgaste de flanco ( $VB_{max}$ ), os mecanismos predominantes observados ao longo do ensaio e uma comparação quantitativa reforçada pela análise estatística (ANOVA). Complementarmente, são apresentados os valores de rugosidade medidos na face de folga, utilizados para apoiar a interpretação dos mecanismos de desgaste.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO GUME

As medições iniciais confirmaram que o raio de gume nominal ( $\rho$ ) e o fator de simetria ( $K$ ) permaneceram estáveis em todas as condições experimentais, com valores médios de  $\rho \approx 0,04$  mm e  $K \approx 1$ , dentro da faixa de tolerância especificada pelo fabricante Iscar.

Essas medições foram realizadas pelo próprio fabricante, que, por questões de confidencialidade técnica, não autorizou a divulgação gráfica dos perfis de gume obtidos.

A manutenção desses parâmetros indica que as diferenças de desempenho observadas entre as ferramentas estão associadas principalmente às modificações introduzidas pelos diferentes tratamentos aplicados ao gume, e não a variações na microgeometria controlada.

Dessa forma, a análise apresentada nesta seção concentra-se nos ângulos medidos, na configuração geométrica local do gume e na condição superficial observada para cada tratamento.

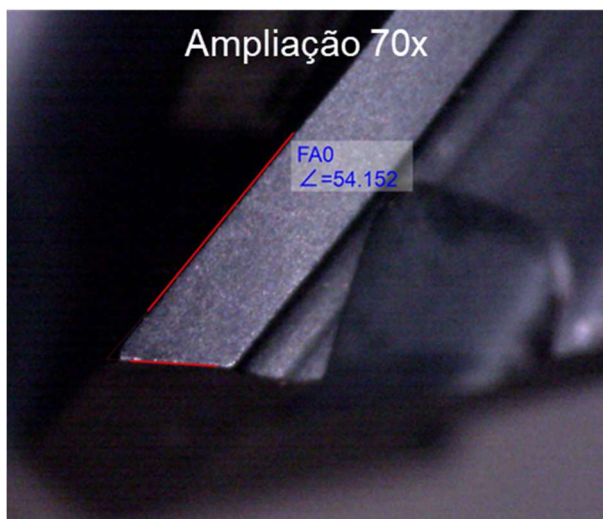
#### 4.1.1 Ferramenta nova tratada por microjateamento

A condição nova, tratada por microjateamento, foi utilizada como referência por corresponder à geometria original de fabricação. O microjateamento aplica partículas abrasivas de forma controlada sobre o gume, removendo microdefeitos e uniformizando a superfície, o que contribui para maior integridade inicial da aresta e melhor aderência do revestimento.

Conforme apresentado na Figura 24, a ferramenta nova apresenta um ângulo de cunha ( $\beta$ ) de  $54,15^\circ$ , correspondente à geometria nominal especificada para esta broca de ponta

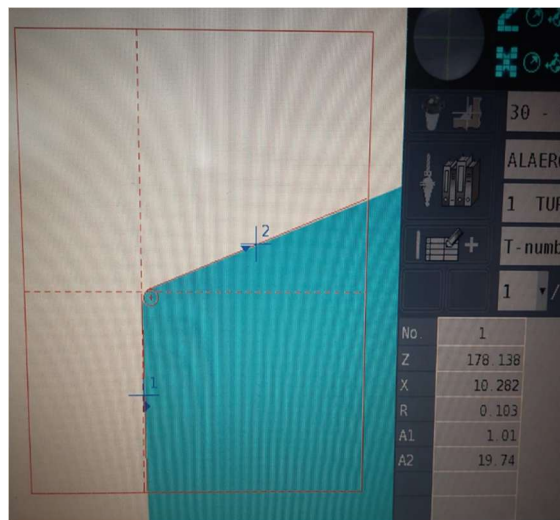
intercambiável. o ângulo de ponta ( $\sigma$ ) de  $19,74^\circ$  resulta em um ângulo total de  $140,52^\circ$ , adotado neste trabalho como referência para comparação com as condições reafiadas. Nessa mesma imagem, é registrado um raio de quina ( $r\epsilon$ ) de  $0,103$  mm, gerado de forma indireta durante o processo de microjateamento, conferindo uma transição suave entre o gume e a face lateral.

Figura 24 – Ângulo da cunha de corte da condição nova.



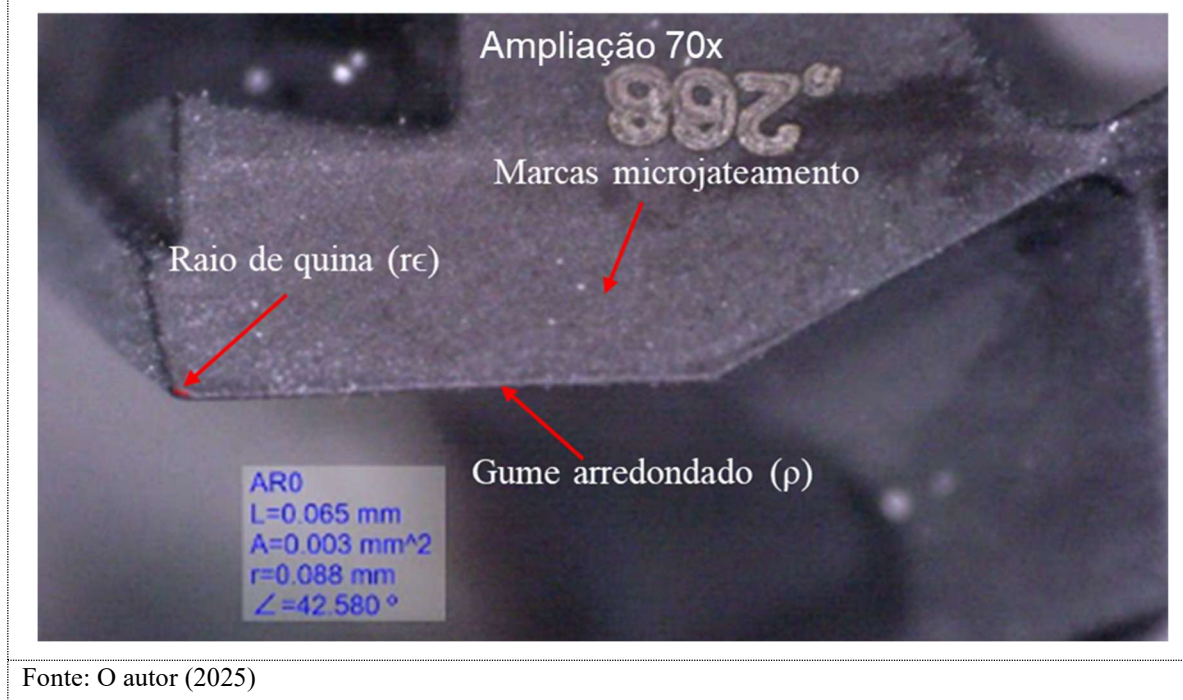
Fonte: O autor (2025)

Figura 25 – Ângulo de ponta e raio de quina da condição nova.



Conforme mostrado na Figura 26, a superfície apresenta aspecto fosco e homogêneo, evidenciando a ação abrasiva controlada do microjateamento. O gume apresenta arredondamento uniforme, sem irregularidades visíveis ou falhas locais, indicando bom acabamento superficial e adequado controle do processo. Além disso, medições complementares em microscopia óptica indicam a formação de um raio adicional na quina, na transição entre o gume principal e a guia lateral, com  $r = 0,088$  mm, proveniente do próprio tratamento. Esse raio adicional atua como reforço do local, potencializando a resistência ao desgaste.

Figura 26 – Ponta nova tratamento por microjateamento.



Essas observações são compatíveis com Bouzakis et al. (2011), que demonstraram a influência das tensões compressivas induzidas pelo microjateamento na redução da taxa de desgaste em ferramentas revestidas. Embora as tensões residuais não tenham sido mensuradas neste estudo, os resultados obtidos indicam comportamento semelhante ao descrito na literatura. De modo complementar, Slaninková et al. (2023) e Straka e Vopat (2022) destacam o microjateamento como uma técnica eficaz para garantir reprodutibilidade geométrica e melhor acabamento superficial na preparação de gumes revestidos.

#### 4.1.2 Ferramenta reafiada tratada por arraste

A condição reafiada e submetida ao tratamento por arraste foi analisada com o objetivo de identificar seus efeitos sobre a geometria do gume. O tratamento por arraste consiste na imersão controlada da ferramenta em um meio abrasivo em movimento, promovendo remoção de material ao longo do gume. Esse processo gera modificações características, como o arredondamento do gume e a redução de microdefeitos provenientes da operação de retífica.

Na Figura 27 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, observa-se que a ferramenta submetida ao arraste apresenta um ângulo de cunha ( $\beta$ ) de 54,08°, valor próximo ao obtido para a condição nova.

Na Figura 28, o ângulo de ponta ( $\sigma$ ) medido foi de  $19,55^\circ$ , resultando em um ângulo total de  $140,9^\circ$ , também semelhante ao da condição original, indicando manutenção da coerência geométrica após o tratamento. Também foi identificado um raio de quina ( $r_c$ ) de  $0,184$  mm, formado de maneira indireta pelo processo de arraste e responsável pela transição entre o gume e a superfície lateral da ferramenta.

Figura 27 - Ângulo da cunha de corte condição reafiada com arraste.

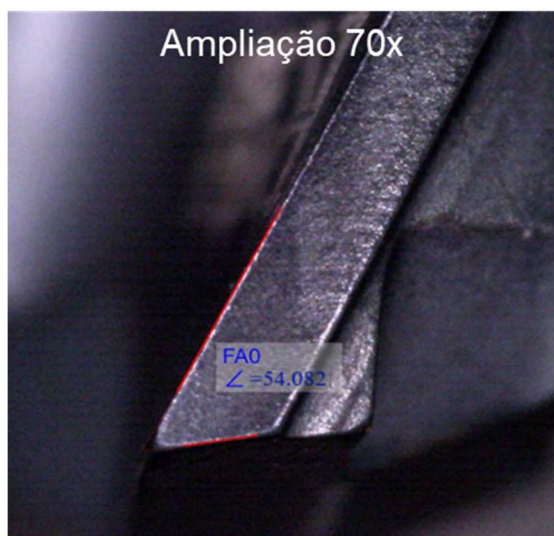
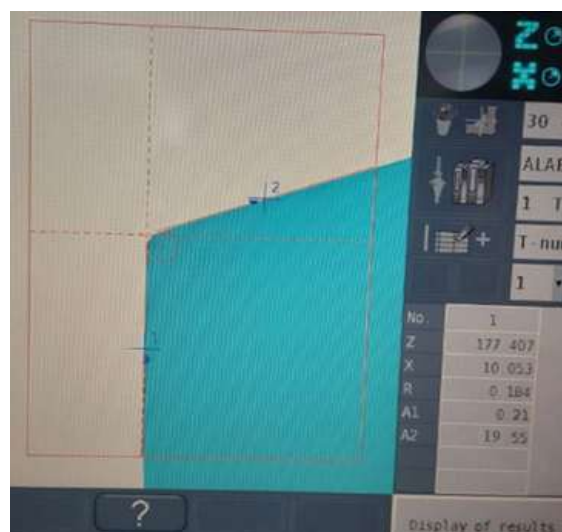


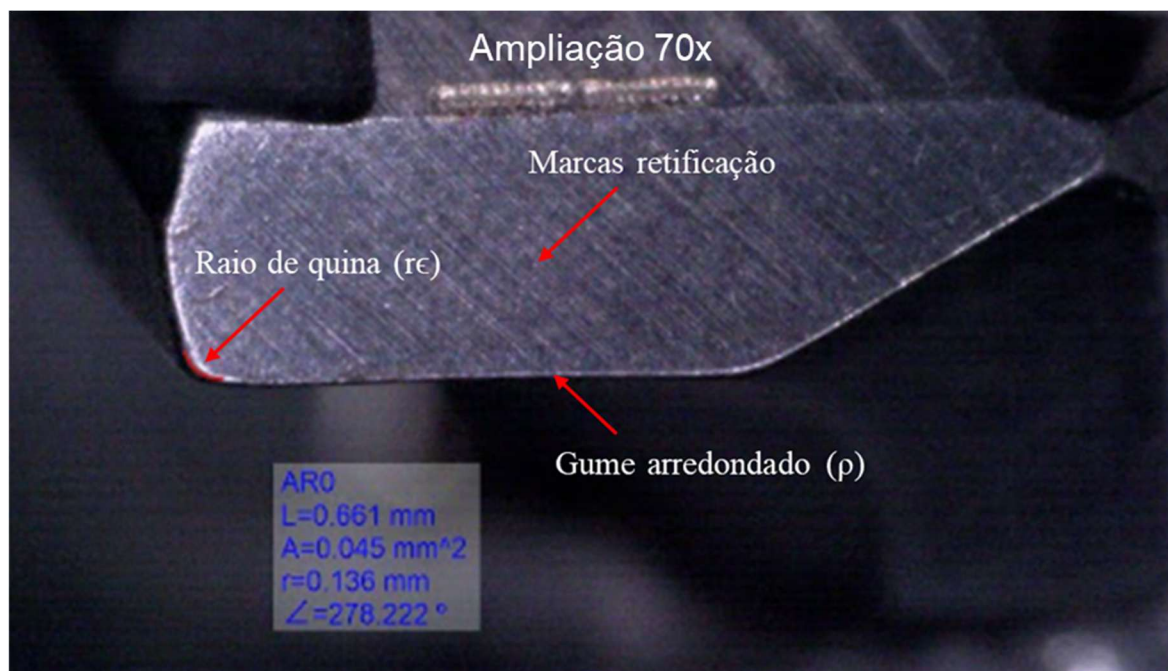
Figura 28 - Ângulo de ponta e raio de quina da condição arraste.



Fonte: O autor (2025)

A Figura 29 apresenta os demais detalhes da micro e macrogeometria. Observa-se um gume arredondado, resultante do tratamento por arraste, com perfil uniforme ao longo de toda a extensão. As marcas provenientes da retificação ainda podem ser identificadas, e não foram observadas irregularidades locais na aresta. O raio de quina ( $r_c$ ) medido foi de  $0,136$  mm, valor intermediário em relação às demais condições analisadas.

Figura 29 – Ponta reafiada tratamento por arraste.



Fonte: O autor (2025)

Observa-se que o tratamento por arraste promoveu a formação de um raio bem definido e uniforme na quina, estabelecendo uma transição suave e bem definida entre o gume e a guia lateral. Essa configuração do gume indica potencialmente maior integridade estrutural e resistência a falhas localizadas nessa região, aspecto avaliado posteriormente nos resultados de desempenho das ferramentas.

Essas observações são consistentes com os estudos de (BERGS et al., 2020; PÉREZ-SALINAS; DEL OLMO; LÓPEZ DE LACALLE, 2022; STRAKA; VOPAT, 2022), os quais descrevem que o tratamento por arraste favorece a formação de gumes com transição controlada e maior estabilidade geométrica.

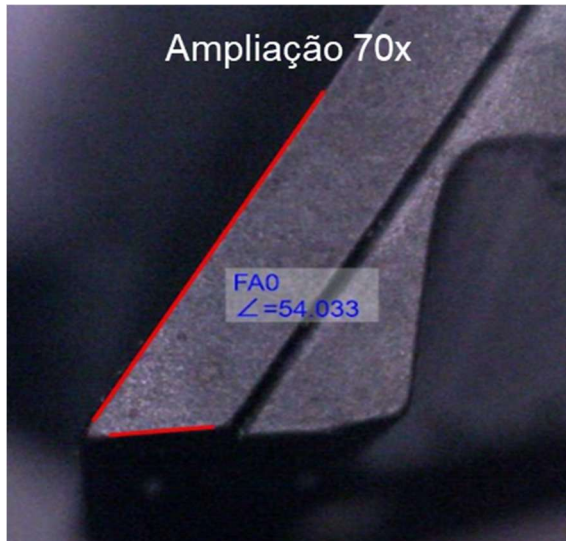
#### 4.1.3 Ferramenta reafiada tratada por escovamento

O escovamento atua predominantemente por fricção mecânica, suavizando as irregularidades deixadas pela retificação e promovendo o arredondamento do gume.

Conforme apresentado na Figura 30, a ferramenta tratada por escovamento apresenta um ângulo de cunha ( $\beta$ ) de  $54,03^\circ$ , valor muito próximo ao da ponta nova. A Figura 31 mostra que o ângulo de ponta ( $\sigma$ ) de  $19,78^\circ$  gera um ângulo total de  $140,44^\circ$ , igualmente semelhante ao da condição original, indicando manutenção da geometria nominal após o reaproveitamento.

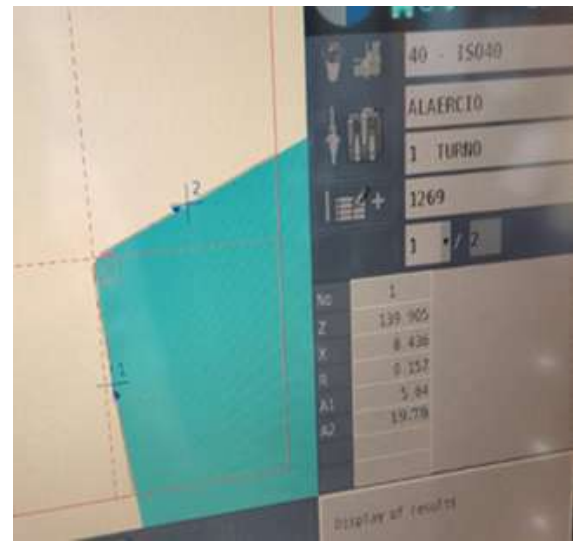
Nota-se ainda a formação de um raio de quina ( $r\epsilon$ ) de 0,157 mm, originado de forma indireta pelo processo de escovamento, o que confere uma transição mais suave entre o gume e a face lateral.

Figura 30 - Ângulo da cunha condição escovamento.



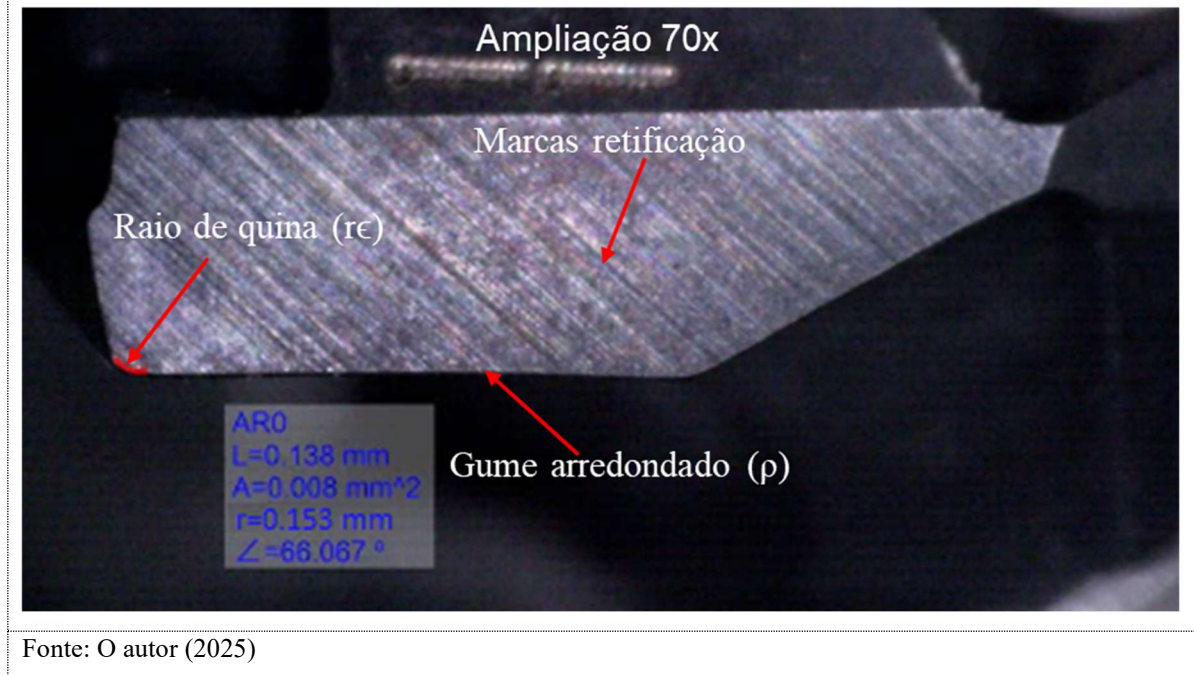
Fonte: O autor (2025)

Figura 31 - Ângulo de ponta e raio de quina da condição escovamento.



O raio de quina medido foi de 0,153 mm, o maior entre as três condições analisadas. Observa-se, contudo, que sua forma difere das demais, o arredondamento é gerado predominantemente no gume, com menor contribuição proveniente da guia lateral. Dessa forma, a transição geométrica entre essas regiões não ocorre de maneira proporcional, resultando em um raio de quina com distribuição assimétrica, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Ponta reafiada tratamento por escovamento.



A retificação realizada para o reaproveitamento da ponta intercambiável é identificada pelas marcas lineares deixadas pelo rebolo. A imagem também evidencia o arredondamento do gume ao longo de toda a sua extensão, indicando que o escovamento gerou uma condição geométrica relativamente uniforme nessa região.

Essas observações estão em concordância com Rodríguez (2009), Bergs et al. (2020) e Straka & Vopat (2022), que descrevem o escovamento como um processo eficaz na suavização do gume e na redução de microdefeitos superficiais, ainda que apresente limitações quanto à consistência geométrica quando comparado a métodos de acabamento como o arraste ou o microjateamento.

#### 4.1.4 Rugosidade da face de folga

Os valores de rugosidade ( $R_a$  e  $R_z$ ) medidos na face de folga das três condições de ponta são apresentados na Tabela 4, incluindo média e desvio padrão das medições realizadas.

Tabela 4 - Rugosidade na face de folga das três condições avaliadas.

Condição	Ra médio ( $\mu\text{m}$ )	DP Ra	Rz médio( $\mu\text{m}$ )	DP Rz
Microjateamento	0,428	0,018	2,845	0,031
Arraste	0,285	0,015	1,829	0,025
Escovamento	0,286	0,020	2,263	0,029

Fonte: O autor (2025).

Observa-se que o microjateamento apresentou os maiores valores de rugosidade média, enquanto as condições tratadas por arraste e escovamento exibiram valores inferiores e próximos entre si para Ra. Em relação ao parâmetro Rz, o arraste apresentou os menores valores médios, indicando superfície mais regular após o tratamento.

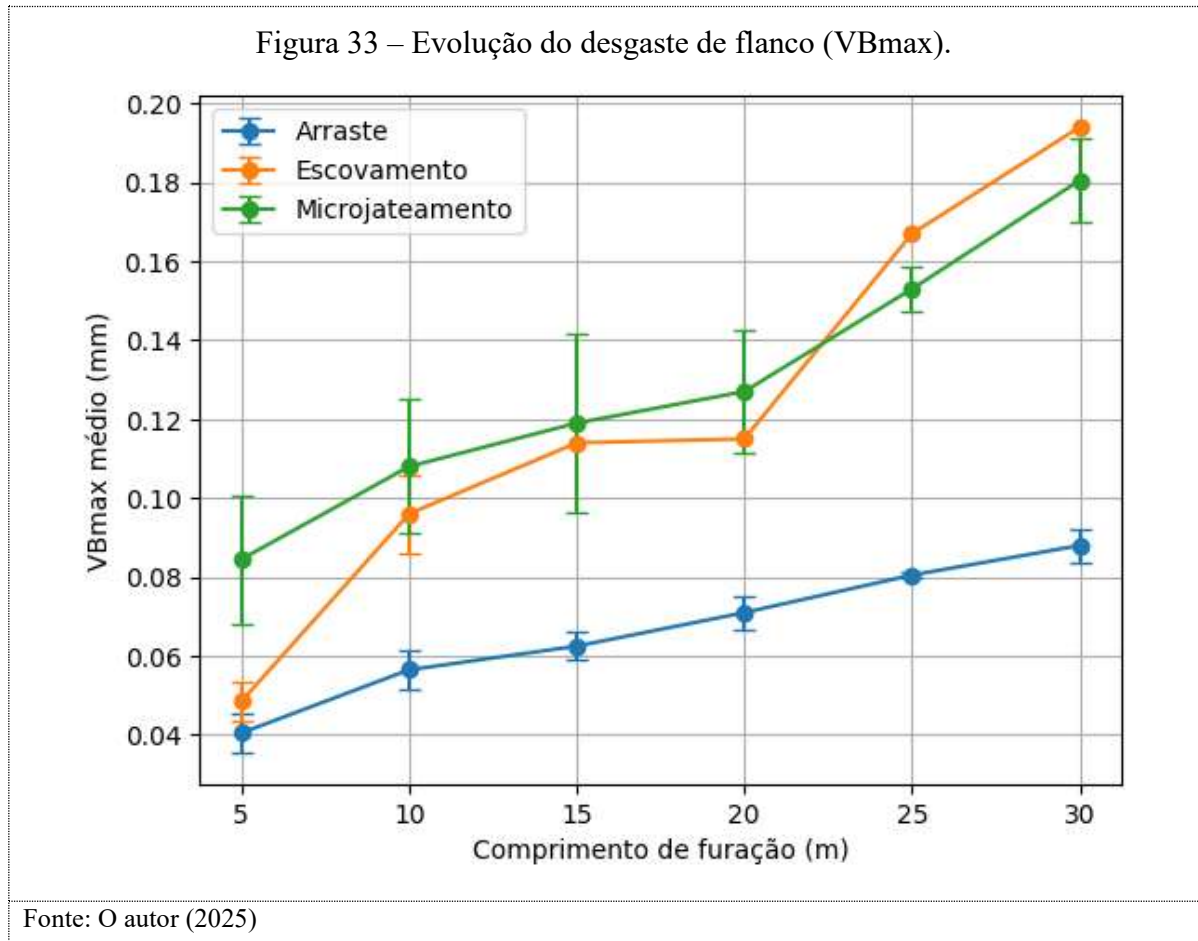
A análise da dispersão mostra que as três condições apresentaram variações relativamente próximas, com ligeira maior dispersão para o escovamento no parâmetro Ra. Essa tendência é compatível com descrições da literatura, que indicam que o microjateamento pode gerar maior irregularidade superficial em função do impacto abrasivo das partículas (BOUZAKIS et al., 2011; BIERMANN; WOLF; ABMUTH, 2012; LV et al., 2021), enquanto processos por arraste tendem a produzir superfícies mais homogêneas e com melhor acabamento (PÉREZ-SALINAS; DEL OLMO; LÓPEZ DE LACALLE, 2022; STRAKA; VOPAT, 2022).

Embora a rugosidade tenha sido medida na face de folga e não diretamente no gume, os valores obtidos fornecem uma indicação complementar sobre a qualidade superficial resultante de cada tratamento, contribuindo para a caracterização comparativa das condições avaliadas neste estudo.

#### 4.2 EVOLUÇÃO DO DESGASTE E COMPROVAÇÃO ESTATÍSTICA

A progressão do desgaste de flanco máximo (VBmax) ao longo dos 30 metros de furação para as diferentes condições experimentais é apresentada na Figura 33, na forma de média e desvio padrão das réplicas disponíveis. É importante contextualizar os resultados obtidos: o ensaio foi conduzido até um comprimento de usinagem fixo de 30 metros, definido como critério de término do teste, em função das restrições de material. Assim, não foi adotado um valor limite normativo de VBmax como critério de fim de vida da ferramenta. Portanto, a análise concentra-se na taxa de evolução do desgaste e na identificação dos estágios da curva dentro desse intervalo experimental. Ressalta-se que, para a condição tratada por escovamento,

uma das réplicas apresentou falha prematura aos 10 m de furação, de modo que, a partir desse ponto, os valores correspondem à única réplica válida, não sendo possível apresentar desvio padrão nos comprimentos subsequentes.



#### 4.2.1 Desgaste VBmax - ferramenta nova tratada por microjateamento

Durante o ensaio, observou-se um desgaste inicial acentuado, atingindo aos 5 m de furação o valor médio de  $VB_{max} = 0,084$  mm, correspondente ao desgaste total verificado na condição tratada por arraste. Na sequência, verificou-se uma fase de estabilização entre 5 m e 20 m, com evolução gradual até  $VB_{max} = 0,127$  mm, indicando boa estabilidade do gume nesse intervalo. A partir dos 20 m, a curva de desgaste evidenciou o início da fase acelerada, alcançando  $VB_{max}$  médio de 0,181 mm aos 30 m de furação. Esse comportamento apresentou semelhança com o observado no tratamento por escovamento, porém com menor magnitude de desgaste, sugerindo tendência a maior vida útil.

O desempenho dessa condição situou-se próximo ao limite inferior recomendado pelo fabricante ( $VB_{max} = 0,20$  mm), indicando que a ferramenta já se encontrava em transição para a condição crítica de substituição.

Esses resultados são compatíveis com Bouzakis et al. (2009), Biermann et al. (2012) e Zhou et al. (2023), que apontam que o microjateamento pode melhorar a condição superficial inicial do gume, mas não necessariamente garante configuração geométrica plenamente controlada, o que pode limitar o desempenho sob condições prolongadas de corte.

#### **4.2.2 Desgaste $VB_{max}$ - ferramenta reafiada tratada por arraste**

A condição tratada por arraste apresentou o melhor desempenho entre as três condições. O valor médio de  $VB_{max}$  manteve-se abaixo de 0,10 mm durante praticamente todo o ensaio, atingindo  $VB_{max}$  0,088 mm ao final dos 30 m de furação. Esse comportamento indica uma evolução gradual do desgaste, sem evidências de aceleração ao longo do percurso, caracterizando uma resposta consistente da preparação de gume nas condições de corte adotadas.

A estabilidade observada pode ser associada às características geométricas do gume obtidas pelo processo de arraste e à redução de irregularidades superficiais remanescentes da retificação. O tratamento por arraste atua de forma tridimensional, envolvendo a ferramenta em meio abrasivo em movimento controlado, promovendo remoção de material ao longo de toda a periferia do gume. Essa ação favorece a formação de transições geométricas mais contínuas entre as superfícies adjacentes e maior uniformidade do raio de arredondamento. Como consequência, tende-se a obter distribuição mais homogênea das solicitações mecânicas no gume e menor concentração local de esforços, retardando o surgimento de microdanos iniciais (PÉREZ-SALINAS; DEL OLMO; LÓPEZ DE LACALLE, 2022; STRAKA; VOPAT, 2022; BERGS et al., 2020).

Em comparação às demais condições, o arraste apresentou menor variabilidade e menores valores de desgaste final, indicando comportamento mais consistente em termos de  $VB_{max}$  ao longo do ensaio. Esse resultado está alinhado a estudos que relacionam a redução de microdefeitos superficiais e a uniformidade geométrica do gume, obtidas em processos como o drag finishing, à maior estabilidade do desgaste e ao retardamento da transição para a fase acelerada (PÉREZ-SALINAS; DEL OLMO; LÓPEZ DE LACALLE, 2022; STRAKA; VOPAT, 2022; BERGS et al., 2020).

### 4.2.3 Desgaste VBmax - ferramenta reafiada tratada por escovamento

Ao analisar a curva de desgaste para a condição por escovamento, identificam-se os três estágios típicos do processo. No primeiro, até 10 m de furação, o VBmax atinge 0,096 mm, o que corresponde a cerca de 50% do desgaste final observado. No segundo estágio, entre 10 m e 20 m, ocorre uma evolução mais lenta, com VBmax chegando a 0,11 mm ao final desse intervalo. A partir de 20 m, verifica-se o início da fase de aumento acelerado do desgaste, alcançando VBmax de 0,194 mm aos 30 m de furação, valor que coincide com o limite crítico de substituição recomendado para a ferramenta.

O comportamento observado indica uma fase estável de curta duração, seguida por aumento acelerado do desgaste, possivelmente relacionado às características geométricas obtidas com esse tipo de preparação. O escovamento atua predominantemente por fricção superficial, produzindo alterações limitadas na região do gume e sem induzir compressão superficial significativa. Como consequência, pode ocorrer redução da integridade geométrica do gume, favorecendo o surgimento antecipado de microlascamentos e a subsequente remoção gradual de material.

De modo geral, a condição tratada por escovamento apresentou predominância de adesão combinada com abrasão, com progressão acelerada do desgaste e maior concentração de danos na região da quina. Esse comportamento é coerente com a literatura, que descreve o escovamento como um método capaz de suavizar o gume, porém potencialmente mais suscetível à geração de variabilidade geométrica local quando comparado a processos como o arraste (RISSE, 2006; STRAKA; VOPAT, 2022; BERGS et al., 2020). Nessas condições, pequenas variações na microgeometria podem favorecer a atuação precoce de mecanismos de adesão e a evolução irregular do desgaste, conforme observado nesta condição experimental.

### 4.2.4 Síntese e comparação com critérios de vida

A literatura de usinagem estabelece que o critério convencional de fim de vida para brocas de metal duro situa-se tipicamente em VBmax  $\approx$  0,30 mm (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014; Astakhov, 2024). Para as ferramentas utilizadas neste estudo, o fabricante recomenda um intervalo entre 0,20 mm e 0,30 mm como referência para substituição. Ressalta-se, entretanto, que neste trabalho não foi adotado um valor limite de VBmax como critério de encerramento

do ensaio, uma vez que o término foi definido pelo comprimento total de furação (30 m), conforme descrito na metodologia.

Ainda assim, a comparação com os valores de referência permite contextualizar o nível de desgaste atingido pelas ferramentas. Nenhuma das condições avaliadas alcançou o limite superior de 0,30 mm; entretanto, as condições tratadas por escovamento e microjateamento apresentaram valores próximos ao limite inferior de 0,20 mm, indicado como critério de troca preventiva. Esse comportamento é coerente com Miklós et al. (2019), que, ao avaliar brocas de ponta intercambiável em aço C56E2, observaram que o desgaste de flanco máximo (VBmax) após 350 ciclos permaneceu abaixo de 0,20 mm na condição de melhor desempenho.

#### 4.2.5 Análise de variância (ANOVA) e validação

A análise estatística foi conduzida com o objetivo de verificar a significância das diferenças observadas no desgaste de flanco (VBmax), considerando apenas as condições nova com microjateamento e reafiada com arraste, uma vez que ambas apresentaram duas réplicas válidas ao final dos ensaios. A condição reafiada com escovamento não foi incluída na ANOVA devido à falha prematura de uma das réplicas, o que inviabilizou sua comparação estatística. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da ANOVA.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de liberdade (GL)	Quadrado médio (QM)	F	p-valor
Tratamento	0,00682	1	0,00682	131,13	0,0075
Erro	0,00010	2	0,00005	—	—
Total	0,00692	3	—	—	—

Fonte: O autor (2025).

Considerando o nível de significância  $\alpha = 0,05$ , observa-se que o p-valor = 0,0075 <  $\alpha$ , indicando que o tipo de tratamento do gume exerceu influência estatisticamente significativa sobre o desgaste final das ferramentas. O valor de F = 131,13 indica que a variabilidade média entre os tratamentos é substancialmente superior à variabilidade dentro dos grupos, evidenciando a existência de diferença estatisticamente significativa entre as condições analisadas.

Em termos quantitativos, a condição tratada por arraste apresentou VBmax médio de 0,088 mm, enquanto o microjateamento atingiu VBmax médio de 0,181 mm, representando uma redução de aproximadamente 50% no desgaste ao final dos 30 m de furação. Esse resultado evidencia a maior eficiência do arraste em preservar a integridade do gume nas condições avaliadas.

Esses achados demonstram que pequenas variações na microgeometria do gume podem gerar diferenças estatisticamente significativas no desempenho, sendo que métodos quantitativos, como a ANOVA, permitem evidenciar essa relevância (Denkena & Biermann, 2014).

Além disso, a consistência geométrica do gume, frequentemente expressa pelo fator  $K \approx 1$ , é apontada por Denkena, Lucas e Bassett (2011) como um parâmetro relevante para equilibrar os mecanismos de desgaste no flanco e na face, contribuindo para a redução da variabilidade entre réplicas. Nesse contexto, os resultados indicam que o tratamento por arraste apresentou maior proximidade das condições desejáveis de simetria geométrica, o que se refletiu nos menores valores de VBmax observados no ensaio.

A partir desses resultados quantitativos, tornou-se possível aprofundar a análise sob o ponto de vista qualitativo, buscando identificar os mecanismos de desgaste responsáveis pelas diferenças observadas entre os tratamentos.

### 4.3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS MECANISMOS E TIPOS DE DESGASTE

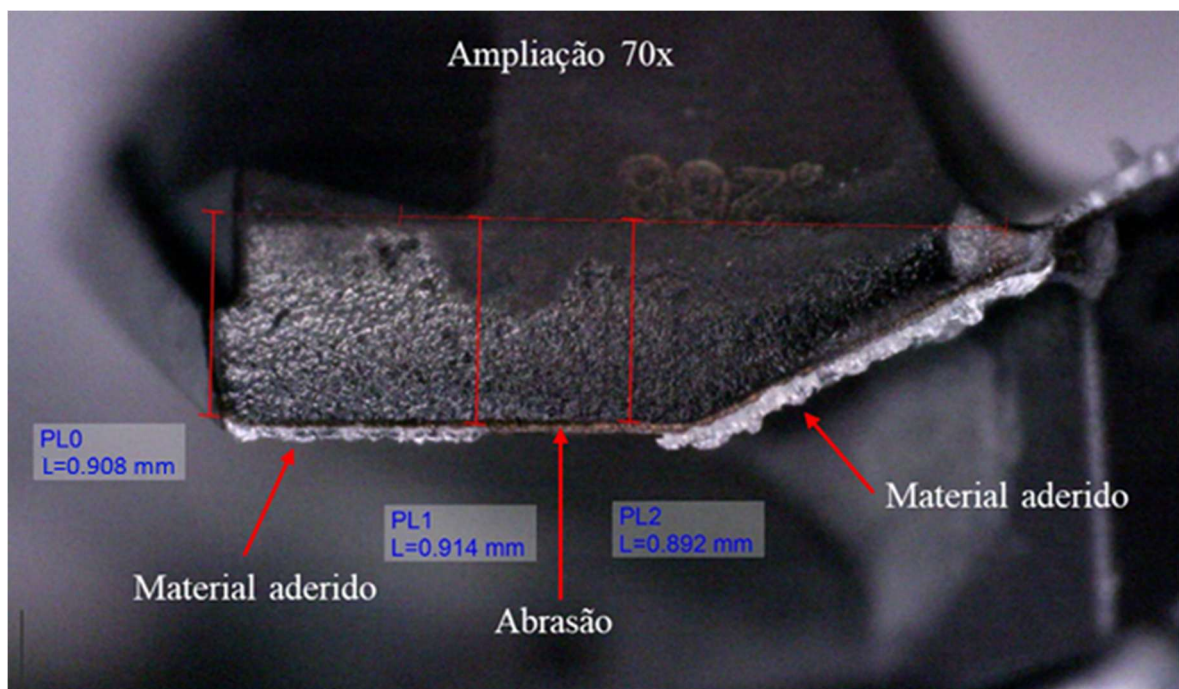
A investigação dos mecanismos e tipos de desgaste é essencial para correlacionar o desempenho das ferramentas (VBmax) com as características geométricas e com os aspectos visuais do gume resultantes dos diferentes tratamentos. Essa análise permite compreender como cada preparação influencia a evolução do desgaste durante a furação, afetando diretamente a durabilidade da ferramenta.

#### 4.3.1 Mecanismos e tipos de desgaste - ferramenta nova tratada por microjateamento

A condição tratada por microjateamento apresentou comportamento intermediário, caracterizado por estabilidade inicial seguida de aumento progressivo do desgaste após 20 m de furação. As imagens obtidas por microscopia óptica permitem identificar principalmente os mecanismos de adesão e abrasão ao longo do ensaio.

Na fase inicial, com 5 m de furação (Figura 34), observa-se a presença de material aderido em grande parte da extensão do gume. Esse fenômeno é típico na usinagem de aços de médio carbono e pode causar instabilidade térmica e mecânica na região de corte. Embora não seja possível caracterizar a sequência temporal dos mecanismos de desgaste apenas pela microscopia óptica utilizada neste trabalho, estudos como os de Biermann et al. (2012) e Slaninková et al. (2023) indicam que a formação inicial de aderência é comum em ferramentas preparadas por microjateamento e pode influenciar a evolução do desgaste subsequente.

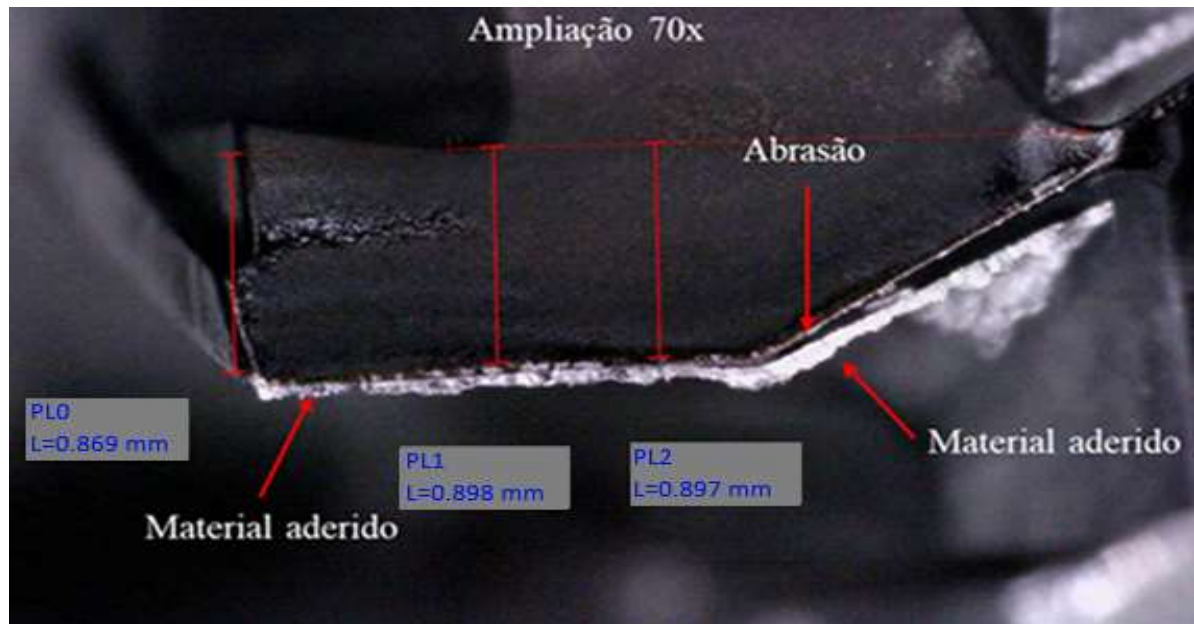
Figura 34 - Manifestação inicial de desgaste (Microjateamento, 5 m).



Fonte: O autor (2025)

Aos 15 m de furação (Figura 35), verifica-se aumento da região desgastada no flanco e persistência do material aderido. A coexistência de desgaste abrasivo e adesão é compatível com os mecanismos descritos na literatura para ferramentas microjateadas, nos quais a remoção intermitente da camada aderida pode gerar danos localizados ao longo do gume (BIERMANN; WOLF; AßMUTH, 2012; STRAKA; VOPAT, 2022). No presente estudo, a microscopia óptica evidencia alterações na superfície do gume e na região da quina, mas não permite confirmar detalhadamente o ciclo adesão-remoção mencionado na literatura, devido às limitações de resolução desse método.

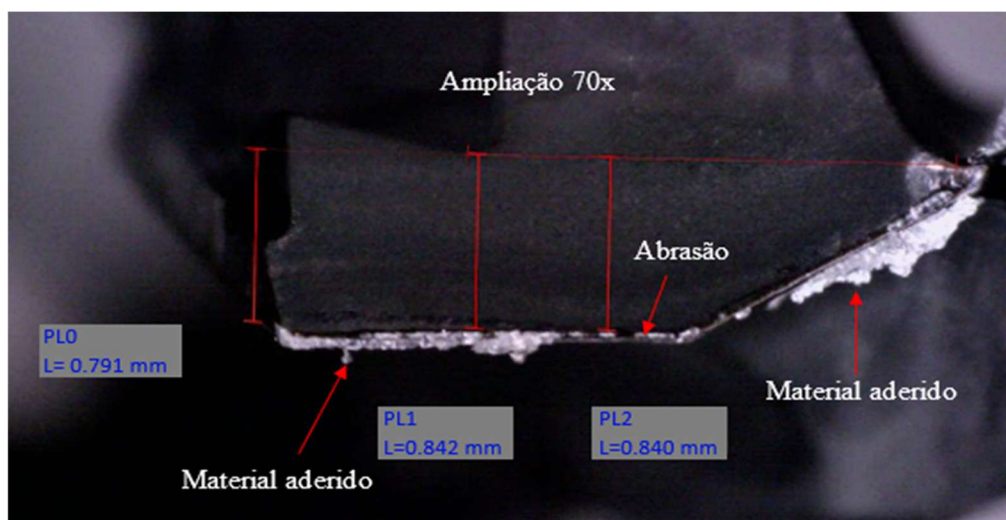
Figura 35 - Evolução do desgaste (Microjateamento, 15 m).



Fonte: O autor (2025)

Na fase final do ensaio, aos 30 m (Figura 36), observa-se desgaste mais pronunciado na região de flanco, acompanhado por acúmulo adicional de material aderido. O valor de VBmax medido nessa réplica foi de 0,190 mm, caracterizando o início da fase acelerada do desgaste. A interação entre abrasão e adesão permanece evidente nas imagens, o que está de acordo com relatos de Zhou et al. (2023), que apontam que ferramentas microjateadas podem apresentar degradação gradual sob condições de corte prolongado, especialmente em materiais com alta afinidade metal-metal.

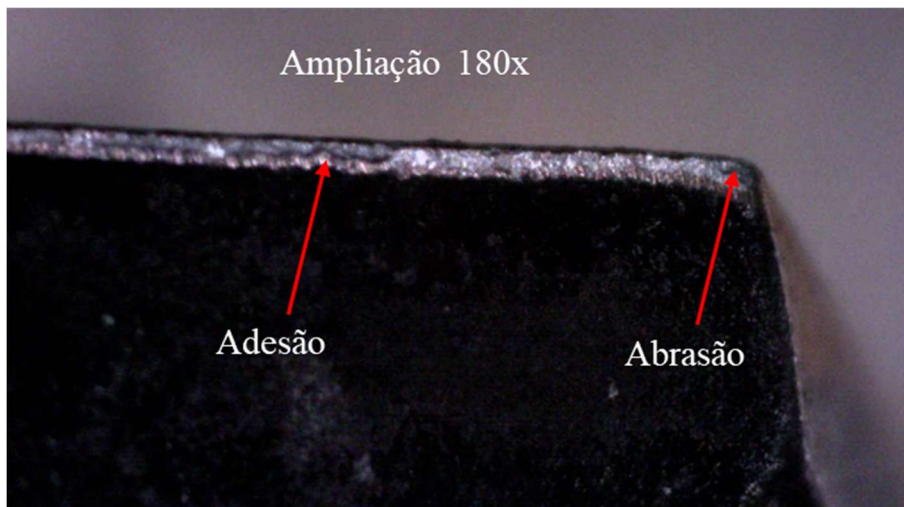
Figura 36 - Fase acelerada do desgaste (Microjateamento, 30 m).



Fonte: O autor (2025)

A ampliação da região da quina (Figura 37) mostra marcas compatíveis com abrasão e áreas com possível adesão localizada. Em alguns pontos do gume, observam-se variações no aspecto superficial; porém, a microscopia óptica utilizada não permite determinar se essas alterações correspondem a perda de material ou apenas a diferenças visuais inerentes ao processo. Assim, a interpretação detalhada dos danos nessa região permanece limitada, sendo necessária uma análise de maior resolução para confirmação.

Figura 37 - Ampliação do desgaste no gume (Microjateamento, 30 m).



Fonte: O autor (2025)

Essas observações concordam com Slaninková et al. (2023) e Straka & Vopat (2022), que relatam que o microjateamento pode melhorar a condição superficial inicial do gume, mas sua eficácia pode ser reduzida em operações contínuas dependendo das características térmicas do material usinado e do nível de adesão gerado. Conforme apontado por Biermann et al. (2012), o desempenho desse tipo de preparação depende fortemente da geometria inicial fornecida pelo fabricante e da integridade do revestimento, o que ajuda a contextualizar o comportamento intermediário observado nesta condição.

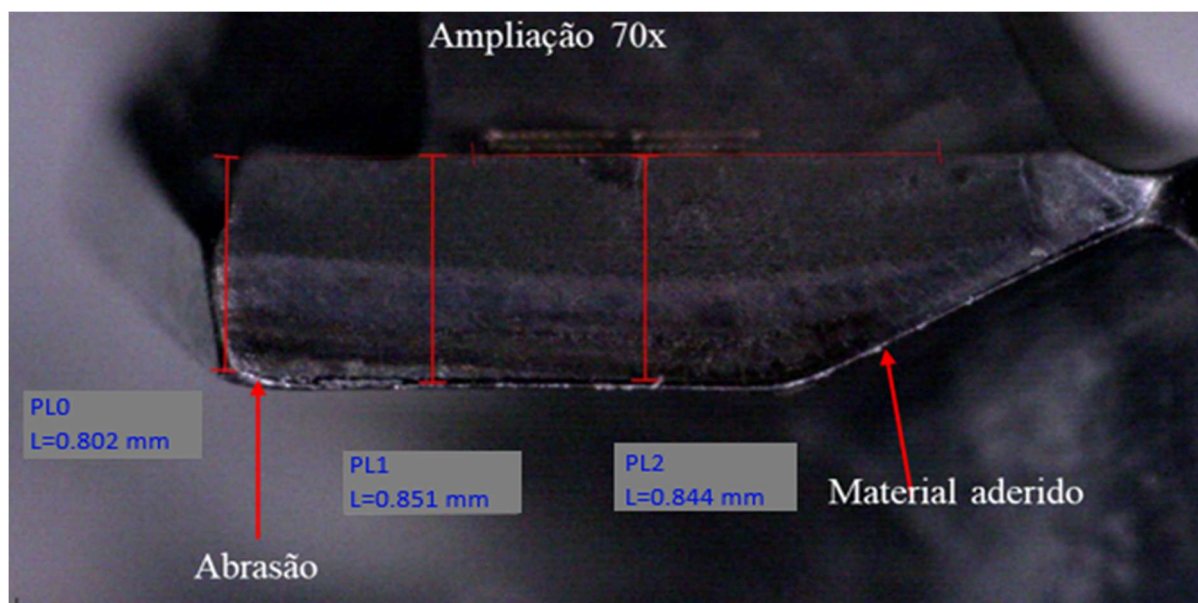
De modo geral, o desgaste na condição tratada por microjateamento foi dominado pela interação entre adesão e abrasão, evoluindo de forma progressiva ao longo da furação. A microscopia óptica permitiu identificar visualmente esses mecanismos, mas não possibilitou uma caracterização quantitativa da superfície, aspecto que poderia complementar a compreensão detalhada do processo.

### 4.3.2 Mecanismos e tipos de desgastes - ferramenta reafiada tratada por arraste

A condição tratada por arraste apresentou valores menores de VBmax ao longo do ensaio e evolução gradual do desgaste, sem sinais de colapso do gume no comprimento avaliado. As imagens obtidas por microscopia óptica permitem identificar predominantemente o mecanismo de abrasão, acompanhado por aderência em regiões específicas.

Na etapa inicial, com 5 m de furação (Figura 38), observa-se uma superfície de flanco praticamente íntegra, com marcas leves e uniformes provenientes do contato inicial com o material usinado. Não se identificam descontinuidades evidentes ou falhas geométricas no gume. Essas características sugerem que o tratamento por arraste resultou em um gume mais uniforme e resistente, capaz de resistir ao atrito e as cargas iniciais sem apresentar sinais de degradação precoce.

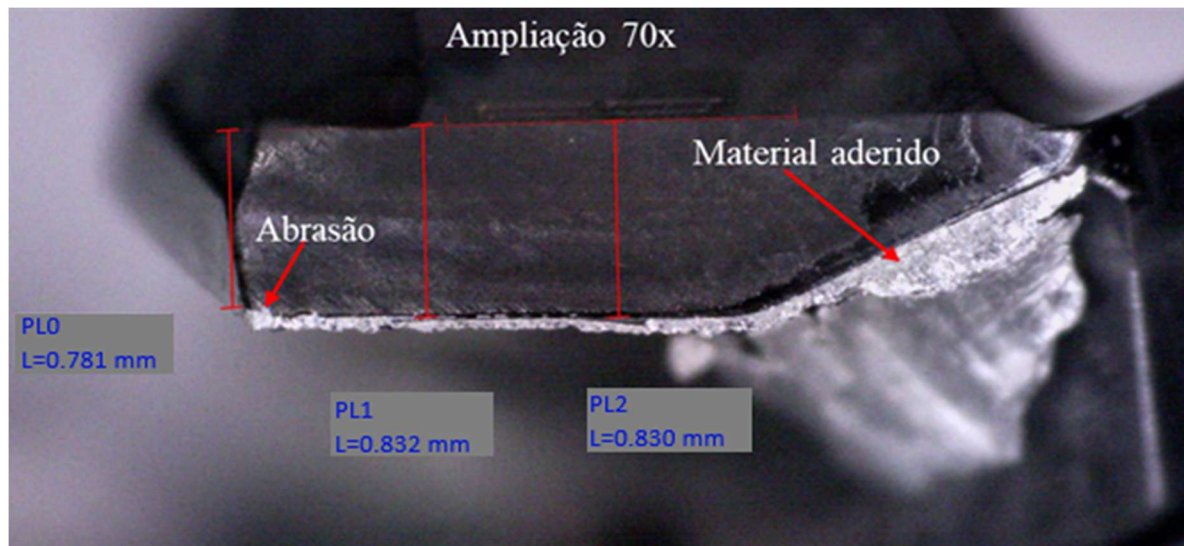
Figura 38 – Desgaste de flanco após 5 m.



Fonte: O autor (2025)

Com o avanço da usinagem, aos 15 m (Figura 39), verifica-se a formação de um desgaste de flanco moderado e uniforme, acompanhado por regiões de material aderido em toda extensão do gume. Esse comportamento é coerente com descrições presentes na literatura sobre ferramentas tratadas por arraste, que associam a remoção controlada de microdefeitos à distribuição mais uniforme das tensões na região do gume (PÉREZ-SALINAS et al., 2022; STRAKA et al., 2022; BERGS et al., 2020).

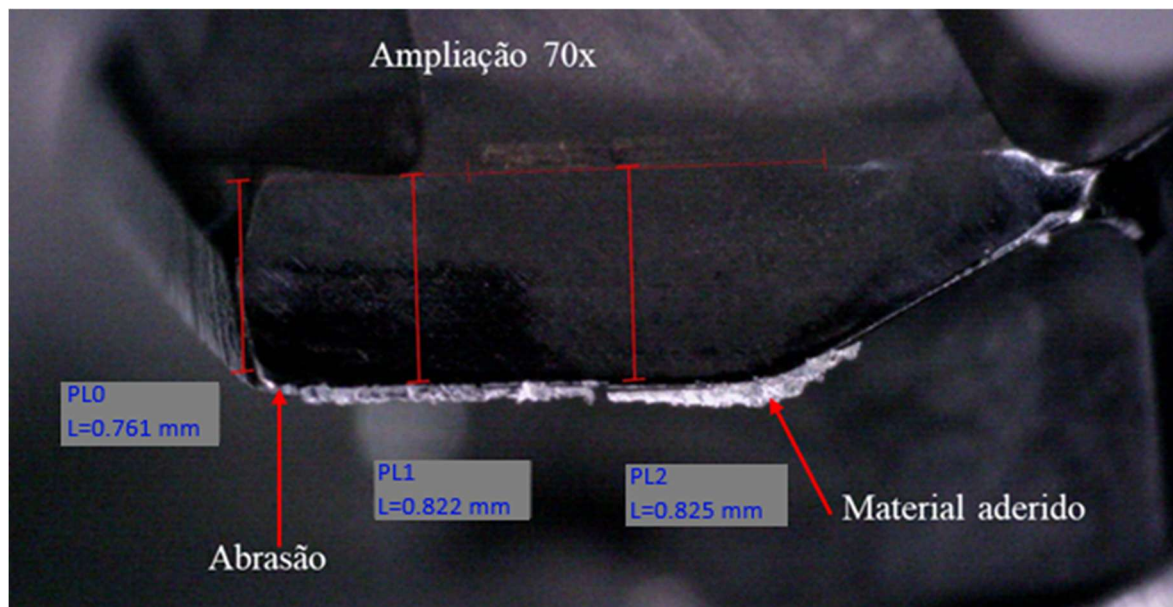
Figura 39 - Desgaste de flanco após 15 m.



Fonte: O autor (2025)

Na fase final do ensaio, aos 30 m (Figura 40), o desgaste permanece regular e concentrado na região de flanco, sem avanço abrupto ou qualquer indício de colapso do gume. Observa-se predominância de abrasão na região da quina, acompanhada de material aderido ao longo de quase toda a extensão do gume.

Figura 40 - Desgaste de flanco após 30 m.



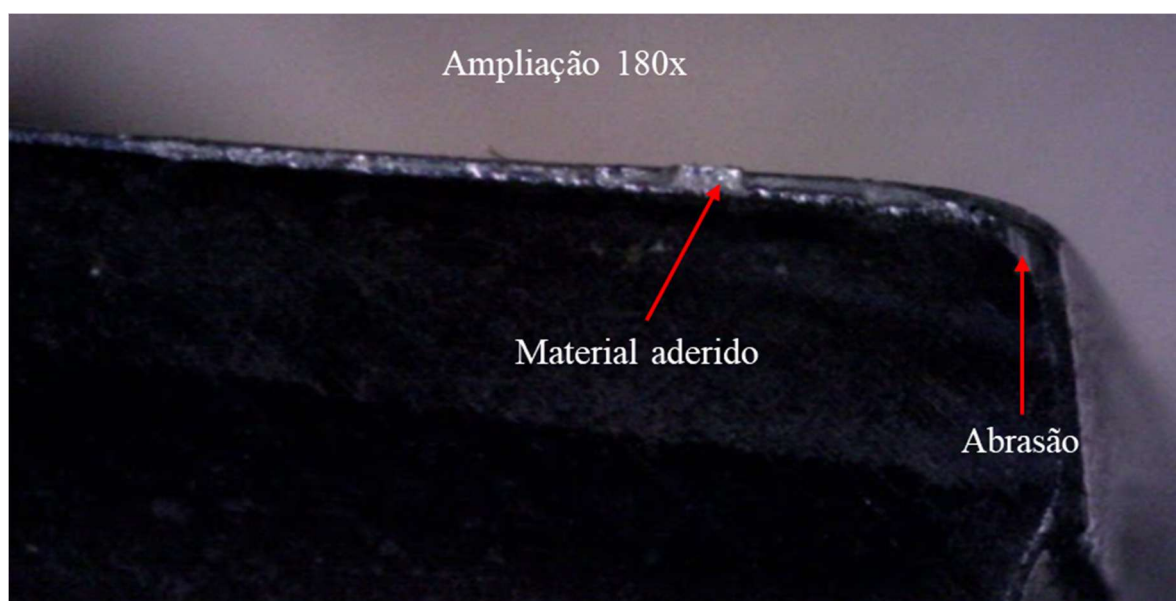
Fonte: O autor (2025)

Resultados compatíveis foram relatados por Zhou et al. (2024), que destacam que o controle da geometria do gume, especialmente em relação à simetria e ao raio aplicado, influencia diretamente a distribuição térmica na região de corte, reduzindo gradientes e a

propensão à adesão localizada. Essa observação é coerente com o comportamento identificado nesta condição, no qual o arraste produziu transições geométricas contínuas que podem ter contribuído para a estabilidade térmica e mecânica durante a furação.

A ampliação da quina (Figura 41) mostra o desgaste na região, com marcas abrasivas visíveis e remoção parcial de material previamente aderido. A microscopia óptica utilizada não permite identificar microtrincas ou fraturas muito pequenas, mas evidencia que os mecanismos de adesão e abrasão atuaram simultaneamente, contribuindo para a evolução do desgaste.

Figura 41 - Ampliação da quina e do gume após 30 m de furação.



Fonte: O autor (2025).

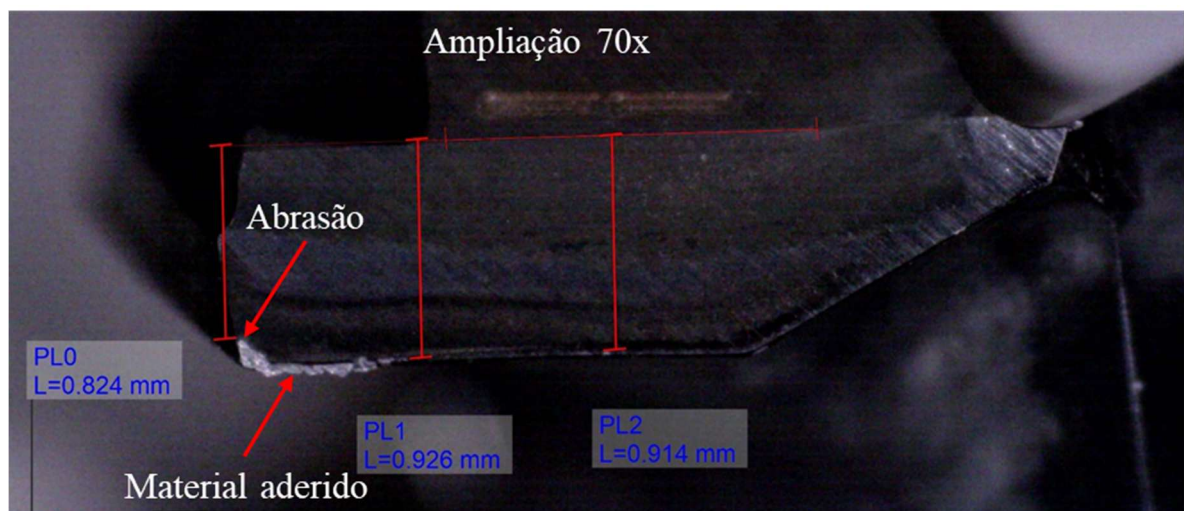
De modo geral, a microscopia óptica evidenciou desgaste predominantemente abrasivo, com adesão localizada. Embora esse método não permita identificar microlascamentos de pequena escala, o arraste apresentou valores finais de VBmax menores do que os obtidos nas demais condições. Esse resultado é compatível com a literatura, que atribui ao arraste a redução de concentrações locais de tensão e menor evolução de danos ao longo da usinagem (PÉREZ-SALINAS et al., 2022; STRAKA et al., 2022; BERGS et al., 2020).

#### 4.3.3 Mecanismos e tipos de desgastes - ferramenta reafiada tratada por escovamento

A condição tratada por escovamento apresentou valores mais elevados de VBmax e evolução acelerada do desgaste ao longo do ensaio. As imagens obtidas por microscopia óptica mostram predominância de adesão combinada com abrasão, com alterações geométricas mais evidentes na região da quina.

Na etapa inicial, aos 5 m de furação (Figura 42), observa-se a presença de material aderido próximo à quina e sinais de abrasão. A microscopia óptica evidencia concentração de desgaste na quina mais pronunciada em comparação às demais condições na mesma etapa, embora não permita caracterizar eventuais microlascamentos. Esses indícios sugerem que o escovamento pode ter resultado em maior variabilidade geométrica inicial, favorecendo a atuação precoce do mecanismo de adesão nessa região, conforme descrito na literatura para esse tipo de preparação (RISSE, 2006; BERGS et al., 2020).

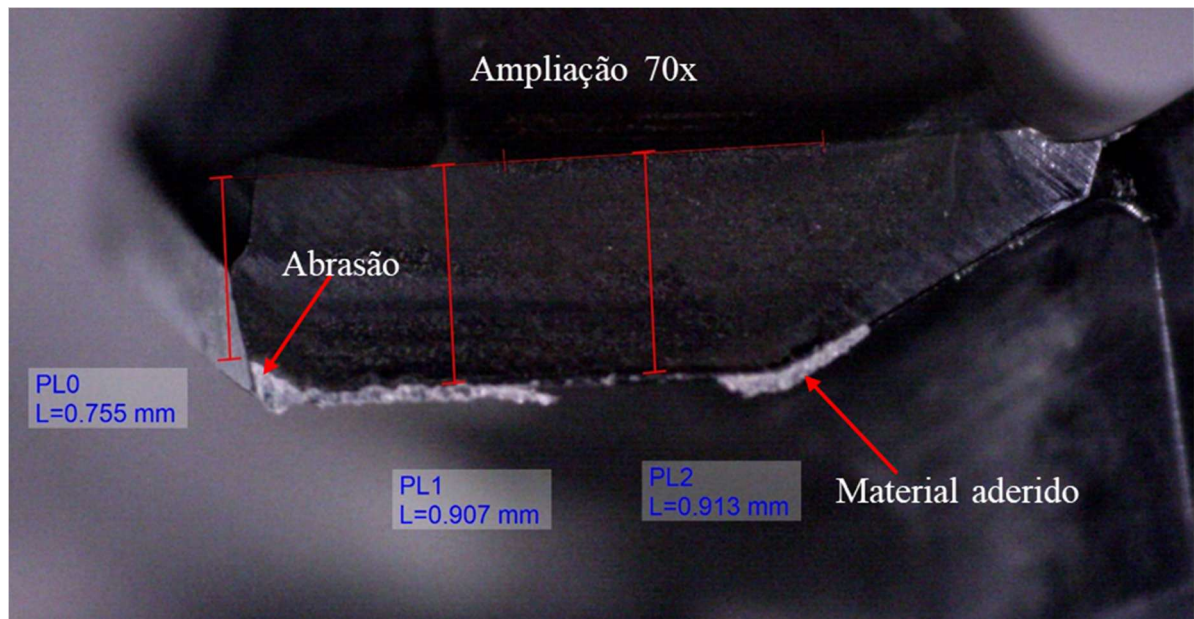
Figura 42 - Manifestação inicial de falha (Escovamento, 5 m)



Fonte: O autor (2025)

Aos 15 m de furação (Figura 43), observa-se aumento da região desgastada na quina, e adesão mais acentuada, distribuída de forma irregular ao longo do gume. As evidências sugerem que o escovamento não gerou um gume suficientemente estável, favorecendo a progressão acelerada do desgaste ao longo do ensaio.

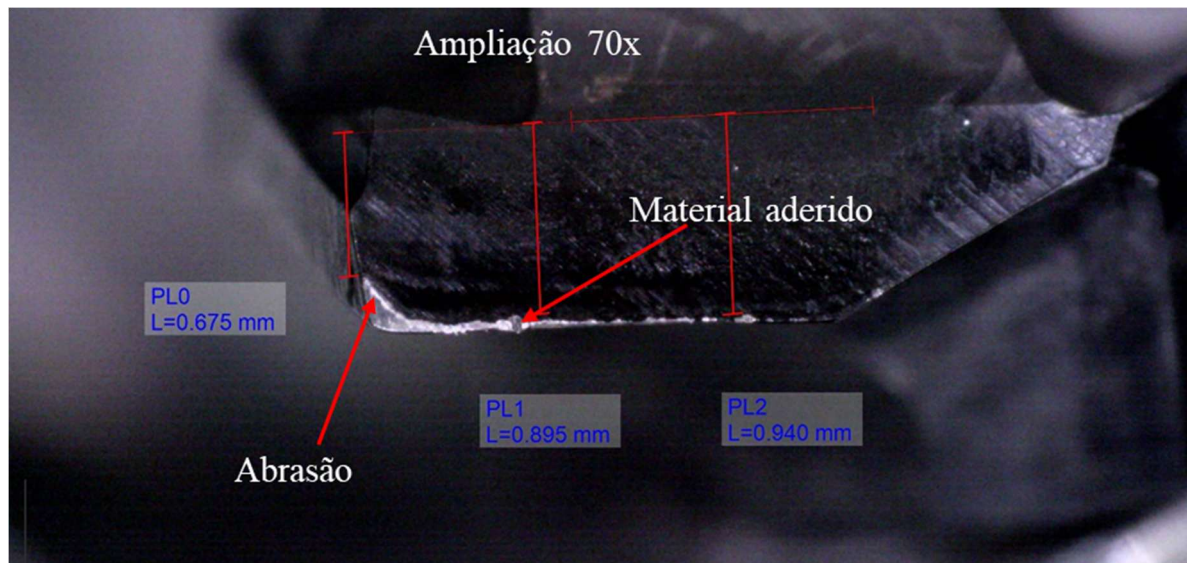
Figura 43 - Rápida Progressão de Desgaste (Escovamento, 15 m).



Fonte: O autor (2025)

Na fase final, aos 30 m (Figura 44), o gume apresenta desgaste severo, mais evidente na região da quina, o que se reflete no valor elevado de VBmax. Observa-se também que a abrasão se intensifica e se estende por uma porção maior do gume, acompanhada pela presença de material aderido. Os mecanismos predominantes são a abrasão concentrada na quina e a adesão ao longo do gume, atuando simultaneamente e contribuindo para a aceleração do desgaste nessa condição.

Figura 44 - Desgaste Crítico (Escovamento, 30 m)



Fonte: O autor (2025)

A ampliação da quina (Figura 45) evidencia um desgaste acentuado, com marcas pronunciadas de abrasão e remoção de parte do material previamente aderido, assim com a presença de material aderido. Esse conjunto de características indica que o escovamento não foi capaz de produzir um gume estável ou uniforme, o que contribuiu para a rápida evolução do desgaste ao longo da furação.

Figura 45 – Ampliação da quina, condição reafiada com escovamento



Fonte: O autor (2025)

De modo geral, a condição tratada por escovamento apresentou predominância de adesão combinada com abrasão, com progressão acelerada do desgaste e maior concentração de danos na região da quina. Esse comportamento é coerente com a literatura, que descreve o escovamento como um método capaz de suavizar o gume, porém dependente de controle rigoroso de parâmetros para assegurar uniformidade geométrica e repetibilidade do raio (RISSE, 2006; BERGS et al., 2020). Estudos comparativos também indicam que ferramentas preparadas por arraste tendem a apresentar maior vida útil do que aquelas submetidas ao escovamento (STRAKA; VOPAT, 2022). No presente estudo, a maior concentração de danos na quina e a predominância de adesão combinada com abrasão sugerem que possíveis variações geométricas locais podem ter favorecido a progressão acelerada do desgaste observada nesta condição.

#### 4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente trabalho avaliou a influência de três métodos de preparação do gume (arraste, microjateamento e escovamento) sobre o desgaste de flanco ( $VB_{max}$ ) em brocas de ponta intercambiável utilizadas na furação do aço SAE 1030. O controle do raio nominal ( $\rho \approx 0,04$  mm) e do fator  $K (\approx 1)$  permitiu isolar o efeito dos tratamentos, assegurando que as diferenças observadas estivessem associadas predominantemente às modificações geométricas e superficiais introduzidas por cada método.

A condição tratada por microjateamento apresentou comportamento intermediário. As imagens de microscopia óptica mostraram material aderido desde os estágios iniciais, evoluindo posteriormente para a combinação entre adesão e abrasão. Esse comportamento é compatível com descrições da literatura, que apontam maior suscetibilidade à formação e remoção recorrente de material aderido em determinadas condições de preparação de gume (SLANINKOVA et al., 2023; STRAKA; VOPAT, 2022). O valor final médio de  $VB_{max}$  (0,180 mm) e a rugosidade mais elevada na face de folga sugerem maior propensão a mecanismos associados à adesão e abrasão ao longo do ensaio.

A condição tratada por arraste apresentou o melhor desempenho. A caracterização geométrica e as observações microscópicas indicaram transições mais suaves entre as superfícies adjacentes ao gume, decorrentes da remoção homogênea de material típica desse processo. Estudos de Pérez-Salinas et al. (2022), Straka e Vopat (2022) e Bergs et al. (2020) indicam que esse tipo de preparação tende a favorecer menor concentração de tensões e

evolução mais gradual do desgaste. Embora o presente estudo não tenha medido tensões residuais, o VBmax permaneceu abaixo de 0,10 mm ao longo de toda a furação, caracterizando a menor progressão de desgaste entre as condições analisadas.

A condição tratada por escovamento apresentou desgaste mais acelerado. As imagens obtidas por microscopia óptica mostraram adesão recorrente nos primeiros metros de furação e abrasão mais intensa na região da quina, indicando menor uniformidade geométrica após o tratamento. Esse comportamento é coerente com estudos que apontam limitações do escovamento na geração de transições geométricas mais estáveis quando comparado a outros métodos de preparação de gume (RISSE, 2006; BERGS et al., 2020). O VBmax final (0,194 mm) aproximou-se do limite inferior recomendado para substituição preventiva.

A análise de variância (ANOVA) indicou diferença estatisticamente significativa entre as condições avaliadas ( $F = 131,13$ ;  $p = 0,0075$ ), evidenciando que o tipo de preparação do gume exerceu influência sobre o desgaste final das ferramentas. A rugosidade medida na face de folga reforçou essa interpretação, indicando maior rugosidade para o microjateamento e valores semelhantes entre arraste e escovamento — embora o comportamento em termos de desgaste tenha diferido em função das modificações específicas produzidas no gume.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a influência de diferentes métodos de preparação de gume sobre o desempenho de brocas de ponta intercambiável na furação do aço SAE 1030, considerando a evolução do desgaste de flanco (VBmax) ao longo de 30 m de usinagem.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- O tratamento por arraste apresentou o menor desgaste de flanco, com evolução gradual e VBmax inferior a 0,10 mm ao longo dos 30 m de furação.
- O microjateamento apresentou comportamento intermediário, com VBmax final de aproximadamente 0,18 mm ao término do ensaio.
- O escovamento exibiu desgaste mais acelerado, resultando em VBmax próximo ao limite inferior recomendado para substituição preventiva.
- O controle do raio nominal e do fator K constantes permitiu atribuir as diferenças observadas predominantemente aos tratamentos aplicados ao gume, evidenciando sua influência direta sobre a evolução do desgaste.

Conclui-se, portanto, que o tratamento por arraste constitui alternativa eficaz para restabelecer o desempenho de ferramentas reafiadas, contribuindo para maior estabilidade do processo e potencial aumento da vida útil em aplicações industriais.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se:

- ampliar o número de amostras e réplicas, fortalecendo a significância estatística dos resultados;
- avaliar o desempenho dos tratamentos de arraste e microjateamento em outros materiais e condições de corte;
- aprofundar o estudo dos métodos de preparação do gume, com foco na influência dos parâmetros operacionais sobre características superficiais e sua relação com o desgaste.

Os resultados apresentados contribuem para o entendimento dos efeitos dos tratamentos de preparação do gume em brocas de ponta intercambiável e fornecem subsídios técnicos para aprimorar práticas industriais de preparação e manutenção de ferramentas.

## REFERÊNCIAS

- ASTAKHOV, Viktor P. **High-productivity drilling tools**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2024.
- BARBOSA, Marcos Guilherme Carvalho Braulio. **Influência da preparação de aresta e do avanço na usinagem do aço VP20TS**. Doutor em Engenharia Mecânica—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 8 jun. 2021.
- BASAVARAJAPPA, S. *et al.* Drilling of hybrid metal matrix composites—Workpiece surface integrity. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 1, p. 92–96, jan. 2007.
- BASSETT, E.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 5, n. 2, p. 108–126, jan. 2012.
- BERGS, T. *et al.* Preparation of symmetrical and asymmetrical cutting edges on solid cutting tools using brushing tools with filament-integrated diamond grits. **Procedia CIRP**, v. 93, p. 873–878, 2020.
- BIERMANN, Dirk; WOLF, Mark; ASSMUTH, Robert. Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills. **Procedia CIRP**, v. 1, p. 172–177, 2012.
- BOUZAKIS, K. D. *et al.* Optimization of wet micro-blasting on PVD films with various grain materials for improving the coated tools' cutting performance. **CIRP Annals**, v. 60, n. 1, p. 587–590, 2011.
- CARDOSO, Marlon José. **Análise do processo de furação profunda no aço SAE 2014 4144M endurecido utilizando MQL e broca helicoidal revestida**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.
- CASTILHO, Willian Jefferson González. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- COPPERMETAL. **Principais aplicações do aço carbono**. Disponível em: <<https://www.coppermetal.com.br/blog/principais-aplicacoes-do-aco-carbono/>>. Acesso em: 29 ago. 2024.
- DANFORD, Matt. **Exchangeable-tip drills explained**. Disponível em: <<https://www.mmsonline.com/articles/exchangeable-tip-drills-explained>>. Acesso em: 19 jul. 2024.
- DENKENA, B.; GROVE, T.; MAISS, O. Influence of the cutting edge radius on surface integrity in hard turning of roller bearing inner rings. **Production Engineering**, v. 9, n. 3, p. 299–305, ago. 2015.
- DENKENA, B.; LUCAS, A.; BASSETT, E. Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermomechanical load. **CIRP Annals**, v. 60, n. 1, p. 73–76, 2011.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber Edidora Ltda, 2014.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1. ed. Brasil: Blucher, 1970.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5. ed. Berlin: Springer, 471 p, 1997.

LÓPEZ DE LACALLE, L. N. *et al.* Monitoring deep twist drilling for a rapid manufacturing of light high-strength parts. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, n. 7, p. 2745–2752, out. 2011.

LV, Dejin *et al.* Analysis of abrasives on cutting edge preparation by drag finishing. **Research Square**, 9 jul. 2021.

MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MAISS, O.; GROVE, T.; DENKENA, B. Influence of asymmetric cutting edge roundings on surface topography. **Production Engineering**, v. 11, n. 4–5, p. 383–388, out. 2017.

MIKLOŠ, Matej *et al.* Identification of tool wear when drilling process of bearings steels C56E2 with microstructure of lamellar pearlite. **Transportation Research Procedia**, v. 40, p. 381–388, 2019.

MUTHUSWAMY, Padmakumar; ANDRODU, Shiva Pradeep. Effect of cutting edge form factor (K-factor) on the performance of a face milling tool. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 31, p. 305–313, nov. 2020.

PÉREZ-SALINAS, Cristian F.; DEL OLMO, Ander; LÓPEZ DE LACALLE, L. Norberto. Estimation of drag finishing abrasive effect for cutting edge preparation in broaching tool. **Materials**, v. 15, n. 15, p. 5135, 24 jul. 2022.

RECH, J. Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool–chip interface in orthogonal dry turning. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, n. 16–17, p. 5132–5139, abr. 2006.

RISSE, Kai. **Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl**. Aachen: Shaker, 2006.

RODRÍGUEZ, C. J. C. **Cutting edge preparation of precision Cutting tools by applying micro-abrasive Jet machining and brushing**. [S.l.]: Kassel University Press, 2009.

SANDVIK. **Brocas com pontas intercambiáveis**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/tools/drilling-tools/exchangeable-tip-drills?taxonomy=TL%2FDRL%2FDRLF%2FDRLF%2FDRLFIS>>. Acesso em: 29 ago. 2024.

SANTANA, Moises Izaias de. **Influência da preparação das arestas de corte de brocas helicoidais no processo de furação**. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

SCHROETER, R. B. *et al.* **Estudo comparativo de desempenho de brocas DIN338**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

SLANINKOVA, Aneta *et al.* Effect of cutting edge preparation technologies on surface roughness, processing time and K-factor. **MM Science Journal**, v. 2023, n. 2, 1 jun. 2023.

STEMMER, Gaspar E. **Ferramentas de corte 2**. Florianópolis: Editora da UFSC, 314 p, 2008.

STRAKA, Robert; VOPAT, Tomas. Cutting edge preparation methods comparison in terms of tool life. *In*: KATALINIC, Branko (Org.). **DAAAM Proceedings**. 1. ed. [S.l.]: DAAAM International Vienna, 2022. v. 1 p. 0188–0192.

TRENT, Edward; WRIGHY, Paul. **Metal cutting**. 4. ed. Woburn: Butterworth Heinemann, 446 p, 2000.

UHLMANN, E. *et al.* Cutting edge preparation of monolithic ceramic milling tools. jun. 2021.

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**, v. 90, n. 9–12, p. 2557–2565, jun. 2017.

VOPAT, Tomas *et al.* Cutting edge microgeometry and preparation methods. *In*: KATALINIC, Branko (org.). 28TH DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION. **Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation**. Vienna: Katalinić, B., 2017. Disponível em: <[http://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings\\_2017/054.pdf](http://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings_2017/054.pdf)>. Acesso em: 15 abr. 2024

ZHAO, T. *et al.* 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, n. 9–12, p. 3611–3618, ago. 2017.

ZHOU, Lihong; WANG, Yongguo; LV, Dejin. Research on cutting edge form factor of milling tool after drag finishing preparation based on discrete element method. **Machines**, v. 12, n. 4, p. 236, 4 abr. 2024.

ZHOU, Yi Dan; WANG, Tao. The simulation of the Influence of honed edge radius on the maximum temperature in drilling 42CrMo with k-grade carbide drill bit. **Advanced Materials Research**, v. 399–401, p. 1848–1851, nov. 2011.

ZHOU, Yu *et al.* Edge preparation methods for cutting tools: a review. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 18, n. 4, p. 50, dez. 2023.

## ANEXO A – DESCRITIVO TÉCNICO ÓLEO ALL PS 100 SS.

**ALL PS 100 SS**

Fluido base Éster, bioestável com propriedades anticorrosivas, isento de óleo mineral, cloro, nitritos e fenóis, para uso em usinagem e retificação de metais ferrosos.

**CARACTERÍSTICAS:**

- Fluido isento de óleo mineral.
- Excelente ação refrigerante e adicionalmente ação lubrificante elevada.
- Alto poder de decantação de finos.
- Excelente resistência à ação microbiana com elevada vida útil do fluido.
- Compatibilidade com materiais ferrosos.

**APLICAÇÃO BÁSICA:**

Recomendado para uso em usinagem geral e de aços carbono, aços ligados, ferro fundido, ligas de níquel e de titânio, quando se deseja um produto de elevada vida útil e alto poder de refrigeração.

**CONCENTRAÇÕES RECOMENDADAS:**

- Usinagem em Geral..... >8%

**VANTAGENS E BENEFÍCIOS:**

- Aumenta a vida útil das ferramentas e do sistema de circulação da solução.
- Garante boa vida útil às soluções.
- Menor custo de manutenção da solução com menor frequência de descarte.
- Ausência de odor fenólico e completa tolerância ao contato humano, evitando dermatites.
- Não ataca pintura, plástico, borracha e outros materiais da máquina operatriz.

**DADOS TÍPICOS**

TESTE	UNIDADE	NORMA	ALL PS 100 SS
Aparência Concentrado	-	Visual	Âmbar
pH da emulsão a 8 %			8,5 a 9,5
Densidade a 20°	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 4052	1,01
Corrosão em Ferro Fundido (GG 25 a 2% em água)	-	DIN 51360 -2	0,0

<b>ALL INDÚSTRIA DE LUBRIFICANTES LTDA</b> Rodovia José Benedito de Paiva, 4185 - Maçaranduba 37.490-000 - São Gonçalo do Sapucaí - MG		Fone: (35) 9979-0031 <a href="mailto:sagunioria@alllubrificantes.com.br">sagunioria@alllubrificantes.com.br</a> <a href="http://www.alllubrificantes.com.br">www.alllubrificantes.com.br</a>
REV- 05	13/12/2023	1/2

Fonte: Adaptado de All Lubrificantes (2025).

**OBSERVAÇÕES:**

- 1- Os dados fornecidos são baseados nas medidas dos resultados dos testes. Pequenas variações podem ocorrer. Em caso de dúvidas, consulte nosso Departamento Técnico.
- 2- Para maiores informações, consulte a FDS (Ficha com Dados de Segurança) para esse produto, fornecida mediante solicitação.