

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS**  
**E DA TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PROCESSOS E TECNOLOGIAS**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME NA VIDA E DESGASTE**  
**DE BROCAS HELICOIDAIS DE METAL-DURO NA FURAÇÃO DE**  
**AISI P20**

**Luccas Augusto Pedrassani Delgado**

**Luccas Augusto Pedrassani Delgado**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME NA VIDA E DESGASTE  
DE BROCAS HELICOIDAIS DE METAL-DURO NA FURAÇÃO DE  
AISI P20**

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de mestre em Engenharia de Processos, orientado por Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann.

Caxias do Sul, 2025

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

D352i Delgado, Luccas Augusto Pedrassani  
Influência do tratamento de gume na vida e desgaste de brocas helicoidais de metal-duro na furação de AISI P20 [recurso eletrônico] / Luccas Augusto Pedrassani Delgado. – 2025.  
Dados eletrônicos.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2025.  
Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.  
Modo de acesso: World Wide Web  
Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>  
1. Brocas (Ferramentas). 2. Desgaste mecânico. 3. Ferramentas de corte. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.95

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

**LUCCAS AUGUSTO PEDRASSANI DELGADO**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME NA VIDA E DESGASTE  
DE BROCAS HELICOIDAIS DE METAL-DURO NA FURAÇÃO DE  
AISI P20**

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de mestre em Engenharia de Processos, orientado por Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 27 DE NOVEMBRO DE 2025**

Orientador: Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann / Universidade de Caxias do Sul - UCS

Banca Examinadora:

Dr. Eng. Giovani Dambros Telli / Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dr. -Ing. Roland Heiler / Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin – HTW

Dr. Eng. Leandro Luis Corso / Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dedico este trabalho aos meus pais, que são os meus maiores incentivadores e exemplos de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente as pessoas mais importantes da minha vida, meus pais Nilton e Maria Lucia, que sempre me apoiaram incondicionalmente, e que nunca mediram esforços para que eu alcançasse os meus sonhos.

Aos meus amigos, em especial a Raíssa, que foi uma pessoa importante, principalmente por todos os bons momentos que passamos juntos durante esta árdua jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, pela contribuição no meu desenvolvimento pessoal e profissional, pelo auxílio e disponibilidade necessária para o contínuo progresso deste trabalho.

Aos colegas do Grupo de Usinagem (GUS), pelo bons momentos de descontração, parceria e amizade, mas principalmente pelo auxílio prestado nos ensaios e conhecimento compartilhado.

A Universidade de Caxias do Sul, pelo provimento da sua infraestrutura para a realização deste trabalho e a agência de inovação e pesquisa UCS INOVA, pelo firmamento deste projeto de pesquisa.

A empresa Dormer Pramet, em especial em nome do Luiz Carlos Vieira Junior, pela parceria neste projeto, por fornecer o substrato e todo o ferramental necessário para os experimentos, além de efetuar o tratamento de gume nas brocas.

A empresa Blaser Swissslube, por fornecer o fluido lubrificante específico para os ensaios de furação.

Ao laboratório LAMEC, em especial ao técnico Gaston, pelo auxílio com os ensaios e experiências trocadas. Ao laboratório LPRA, em especial ao Gerson e Davies, pelo auxílio nos testes e pelo suporte da ferramenta. Ao laboratório LCMIC, pelo auxílio nas análises de MEV e EDS.

A todos que de alguma maneira contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, meu muito obrigado!

*“No que diz respeito ao empenho,  
ao compromisso, ao esforço, à  
dedicação, não existe meio termo.  
Ou você faz uma coisa bem feita  
ou não faz.”*

***Ayrton Senna***

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	22
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>25</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	25
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>26</b>
3.1	MECÂNICA DO CORTE .....	26
3.2	FURAÇÃO .....	28
<b>3.2.1</b>	<b>Broca helicoidal.....</b>	<b>29</b>
3.3	TRATAMENTO DE GUME.....	33
<b>3.3.1</b>	<b>Objetivos do tratamento de gume .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Formas de caracterização do gume.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Processos para o tratamento de gume .....</b>	<b>39</b>
3.3.3.1	Escovamento.....	41
3.4	DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE .....	44
<b>3.4.1</b>	<b>Mecanismos de Desgaste .....</b>	<b>44</b>
3.4.1.1	Abrasão .....	45
3.4.1.2	Adesão .....	47
3.4.1.3	Reações Triboquímicas.....	48
3.4.1.3.1	<i>Oxidação.....</i>	<i>49</i>
3.4.1.3.2	<i>Difusão.....</i>	<i>49</i>
3.4.1.4	Danos na superfície.....	50
3.4.1.4.1	<i>Lascamentos .....</i>	<i>51</i>
3.4.1.4.2	<i>Fissuras .....</i>	<i>51</i>
3.4.1.4.3	<i>Deformações plásticas.....</i>	<i>51</i>
<b>3.4.2</b>	<b>Tipos de desgaste em brocas helicoidais .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Comportamento de desgaste de uma ferramenta de corte .....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Critério de fim de vida de uma ferramenta de corte.....</b>	<b>56</b>
3.5	INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME NO DESGASTE DA FERRAMENTA .....	58
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>66</b>
4.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	66
<b>4.1.1</b>	<b>Dados de Entrada .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Dados de Saída .....</b>	<b>68</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Material e Corpo de Prova.....</b>	<b>69</b>

<b>4.1.4</b>	<b>Equipamentos.....</b>	<b>71</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Ferramentas .....</b>	<b>72</b>
<b>4.2</b>	<b>PRÉ-TESTE.....</b>	<b>75</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>76</b>
<b>5.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO AISI P20 .....</b>	<b>76</b>
<b>5.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA .....</b>	<b>78</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Substrato.....</b>	<b>78</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Macrogeometria.....</b>	<b>81</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Microgeometria e Mesogeometria.....</b>	<b>83</b>
<b>5.3</b>	<b>PRÉ-TESTE.....</b>	<b>88</b>
<b>5.4</b>	<b>DESGASTE DAS FERRAMENTAS.....</b>	<b>90</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Comportamento .....</b>	<b>90</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Mecanismos e Tipos.....</b>	<b>94</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Vida .....</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>102</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>104</b>
	<b>ANEXO A - EQUIPAMENTOS.....</b>	<b>114</b>
	<b>ANEXO B – ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXO C – RELATÓRIO ALICONA .....</b>	<b>117</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Parâmetros de corte utilizados no ensaio (O autor, 2025). .....	67
<b>Tabela 2.</b> Composição química mensurada do aço AISI P20 (O autor, 2025). .....	70
<b>Tabela 3.</b> Propriedades mecânicas resultantes para o aço AISI P20 (O autor, 2025). .....	70
<b>Tabela 4.</b> Relatório do Helicheck dos principais pontos da geometria da broca(O autor, 2025). .....	82
<b>Tabela 5.</b> Parâmetros de caracterização do gume a partir do Alicona (O autor, 2025). .....	83
<b>Tabela 6.</b> Ferramentas do pré-teste (O autor, 2025). .....	88

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Ferramental e condições (O autor, 2025). .....	68
---	----

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mecanismo ideal de formação do cavaco (Adaptado de KÖNIG; KLOCKE, 1997). .....	26
<b>Figura 2.</b> Zonas de formação do cavaco (Adaptado de TÖNSHOFF; DENKENA, 2013).....	27
<b>Figura 3.</b> Variantes do processo de furação de acordo com a DIN 8589-2 (Adaptado de KÖNIG; KLOCKE, 1997).....	28
<b>Figura 4.</b> Particularidades da geometria de uma ferramenta de corte (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009). .....	30
<b>Figura 5.</b> Broca helicoidal com haste cônica segundo a norma DIN 1412 (Adaptado de KLOCKE, 2011). .....	30
<b>Figura 6.</b> Macrogeometria de uma broca helicoidal de acordo com a DIN 8589-2 (Adaptado de STEMMER, 2005a; KLEIN, 1975; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; KLOCKE, 2018). .	31
<b>Figura 7.</b> Diferentes macrogeometrias geradas a partir de formas especiais de afiações de brocas, seguindo a norma DIN 1412 (Adaptado de SCHMIER, 2004). .	31
<b>Figura 8.</b> Superfície convexa e contorno gerados (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009). .	32
<b>Figura 9.</b> Caracterização dos entalhamentos “notchedness” (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009). .....	33
<b>Figura 10.</b> Esquema comparação do gume afiado com o gume pós preparação (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009). .....	34
<b>Figura 11.</b> Definição do arredondamento do raio do gume de acordo com a DIN 6582 (esq.) e parâmetros de caracterização do gume de acordo com Denkena <i>et al.</i> , 2002 (dir.) (Adaptado de KLOCKE, 2018). .....	36
<b>Figura 12.</b> Classificação da geometria do gume conforme arredondamento (Adaptado de Denkena <i>et al.</i> , 2005). .....	36
<b>Figura 13.</b> Geometrias típicas geradas pelo tratamento de gume (Adaptado de HECKMANN, 2010). .....	37
<b>Figura 14.</b> Processos de tratamento de gume (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009). .	40
<b>Figura 15.</b> Processo de escovamento (Adaptado de TIKAL, 2009; RODRÍGUEZ, 2009). .....	42
<b>Figura 16.</b> Mecanismos de desgaste (Adaptado de KLOCKE, 2018; ZUM GAHR, 1992). .....	44
<b>Figura 17.</b> Principais mecanismos de desgaste presentes em ferramenta de corte (Adaptado de KÖNIG; KLOCKE, 1997). .....	45
<b>Figura 18.</b> Tipos de danos causados por partículas abrasivas (Adaptado de ZUM GAHR, 1987). .....	46
<b>Figura 19.</b> Esquema de formação periódica do gume postiço (esq.), e do desgaste de flanco em relação a formação do gume postiço (dir.) (Adaptado de KLOCKE, 2018). .....	48
<b>Figura 20.</b> Desgastes usuais de uma broca helicoidal (Adaptado de BRINKSMEIER, 1990). .....	52
<b>Figura 21.</b> Tipos de desgastes de uma broca helicoidal com suas nomenclaturas (Adaptado de KANAI, 1978). .....	53

<b>Figura 22.</b> Comportamento de desgaste de uma ferramenta de corte em relação ao tempo de usinagem (Adaptado de DAVIM, 2008; MACHADO <i>et al.</i> , 2009). .....	55
<b>Figura 23.</b> Curvas teóricas do comportamento de desgaste de uma ferramenta de metal-duro (Adaptado de KLOCKE, 2018). .....	57
<b>Figura 24.</b> Cadeia de efeitos da influência do tratamento de gume no processo de usinagem (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009). .....	58
<b>Figura 25.</b> Influência do raio do gume no desgaste da ferramenta de corte (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009). .....	60
<b>Figura 26.</b> Relação do raio do gume em relação a vida relativa da ferramenta de corte (Adaptado de TIKAL, 2009). .....	61
<b>Figura 27.</b> Relação do fator de forma K com a vida da ferramenta de corte (Adaptado de BASSET <i>et al.</i> , 2012). .....	62
<b>Figura 28.</b> Comportamento de desgaste para diferentes tratamentos de gume (Adaptado de TIKAL, 2009). .....	63
<b>Figura 29.</b> Planejamento experimental (O autor, 2025). .....	66
<b>Figura 30.</b> Fixação do corpo de prova e estratégia da furação (O autor, 2025). .....	71
<b>Figura 31.</b> Características macrogeométrica da broca (O autor, 2025). .....	73
<b>Figura 32.</b> Processo de escovamento (O autor, 2025). .....	74
<b>Figura 33.</b> Caracterização da microestrutura presente no CP (O autor, 2025). .....	76
<b>Figura 34.</b> Análise das inclusões presentes no CP por MEV e EDS (O autor, 2025). .....	77
<b>Figura 35.</b> Análise do tamanho de grão do WC e do espectro de elementos químicos presentes no substrato da broca por MEV e EDS (O autor, 2025). .....	79
<b>Figura 36.</b> Análise do revestimento da broca (O autor, 2025). .....	80
<b>Figura 37.</b> Macrogeometria das brocas (O autor, 2025). .....	81
<b>Figura 38.</b> Visualização da microgeometria do gume, pelo MEV (O autor, 2025). .....	85
<b>Figura 39.</b> Vista da microgeometria do gume principal, gerada no Alicona (O autor, 2025). .....	86
<b>Figura 40.</b> Mesogeometria do gume das brocas (O autor, 2025). .....	87
<b>Figura 41.</b> Avaliações das questões relacionadas ao pré-teste (O autor, 2025). .....	89
<b>Figura 42.</b> Comportamento de desgaste das brocas (O autor, 2025). .....	91
<b>Figura 43.</b> Correlação Bivariada e comparação do Resíduo para o comportamento de desgaste (O autor, 2025). .....	93
<b>Figura 44.</b> Teste estatístico de Durbin-Watson (O autor, 2025). .....	94
<b>Figura 45.</b> Progressão do desgaste de flanco das brocas (O autor, 2025). .....	95
<b>Figura 46.</b> MEV dos tipos e mecanismos de desgaste encontrados nas brocas (O autor, 2025). .....	96
<b>Figura 47.</b> MEV/EDS do flanco/quina das brocas (O autor, 2025). .....	98
<b>Figura 48.</b> Vida das Brocas para um VBMAX = 0,1 mm (O autor, 2025). .....	100
<b>Figura 49.</b> Equipamentos de caracterização (O autor, 2025). .....	114
<b>Figura 50.</b> Equipamentos máquina-ferramenta (O autor, 2025). .....	114
<b>Figura 51.</b> Ensaio de tração do CP de AISI P20 (O autor, 2025). .....	115

<b>Figura 52.</b> Ensaio de impacto do CP de AISI P20 (O autor, 2025).....	116
<b>Figura 53.</b> Relatório gerado no Alicona para uma das ferramentas da condição STD (O autor, 2025).....	117
<b>Figura 54.</b> Relatório gerado no Alicona para uma das ferramentas condição EP (O autor, 2025).....	118

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i> Associação Francesa de Normalização
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> Instituto Americano do Ferro e do Aço
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de Alumínio
BSE	Elétrons Retroespalhados
B.S.	<i>British Standards</i> Normativas Britânicas
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada
CCM	Microscopia Confocal Cromática
CLSM	Microscopia Confocal de Varredura a Laser
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CP	Corpo de Prova
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> Instituto de Normativas Alemã
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
EP	Escovamento com polimento
GUS	Grupo de Usinagem (UCS)
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> Organização Internacional para Padronização
LAMEC	Laboratório de Ensaio Mecânicos (UCS)
LCMIC	Laboratório Central de Microscopia (UCS)
LPRA	Laboratório de Prototipagem Rápida (UCS)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

MFPP	<i>Microscopic Fringe Projection Profilometry</i> Profilometria 3D
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PCD	Diamante Policristalino
PVD	Deposição Física de Vapor
SE	Elétrons Secundários
SiC	Carbeto de Silício
STD	Sem Tratamento
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiN	Nitreto de Titânio
UCS	Universidade de Caxias do Sul
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> Associação dos Engenheiros Alemães
WC	Carboneto de Tungstênio

## LISTA DE SIMBOLOS

$\alpha$	Ângulo de Incidência/Folga (°)
$\alpha$	Nível de Significância (%)
$\beta$	Ângulo de Cunha (°)
$\gamma$	Ângulo de Saida (°)
$\gamma_b$	Ângulo do Chanfro do Gume (°)
$\Delta r$	Distância do Gume Afiado Teórico Para o Topo do Contorno Real ( $\mu\text{m}$ )
$\delta$	Ângulo de Hélice (°)
$\varepsilon$	Ângulo de Quina (°)
$\sigma$	Ângulo de Ponta (°)
$\phi$	Angulo de Cisalhamento (°)
$\phi$	Contorno do Gume ( $\mu\text{m}$ )
$\varphi$	Desvio Angular do Vetor $\Delta r$ (°)
$\psi$	Angulo do Gume Transversal (°)
$A\alpha$	Superfície do Flanco (-)
$A\gamma$	Superfície da Face (-)
$a_p$	Profundidade Axial de Corte (mm)
$a_e$	Profundidade Radial de Corte (mm)
$b_n$	Comprimento do Chanfro do Gume ( $\mu\text{m}$ )
$b_\gamma$	Comprimento do Chanfro do Gume ( $\mu\text{m}$ )
$C_m$	Desgaste de Gume Transversal Tangencial ao Gume (mm)
$C_t$	Desgaste de Gume Transversal Perpendicular ao Gume (mm)
$d$	Diâmetro da Broca (mm)
$F_c$	Força de Corte (N)
$F_f$	Força de Avanço (N)
$f_z$	Avanço por Gume (mm/gume)
$h$	Espessura da Usinagem (mm)
$h_{ch}$	Espessura do Corte (mm)
$h_{min}$	Espessura Mínima do Cavaco (mm)
$K$	Fator de Arredondamento do Gume (-)
$KT$	Desgaste de Cratera (mm)

$l_t$	Profundidade da Furação (mm)
$M_W$	Desgaste de Guia (mm)
$n$	Perfil Referente ao Entalhamento Nominal (-)
$n_r$	Rotação da Escova (rpm)
$P_m$	Lascamento no Gume - Comprimento do Gume (mm)
$P_n$	Plano Normal de Corte (-)
$P_t$	Lascamento no Gume - Profundidade do Gume (mm)
$r_\beta$	Raio do Gume ( $\mu\text{m}$ )
$r_\epsilon$	Raio de Quina (mm)
$\bar{S}$	Arredondamento Médio ( $\mu\text{m}$ )
$S_\alpha$	Comprimento da Extensão Virtual do Flanco ( $\mu\text{m}$ )
$S_\gamma$	Comprimento da Extensão Virtual da Face ( $\mu\text{m}$ )
$S_{wy}$	Deslocamento do Centro do Círculo do Arredondamento ( $\mu\text{m}$ )
$t_c$	Tempo de Corte (min)
$t_v$	Profundidade da Deformação ( $\mu\text{m}$ )
$VB$	Desgaste de Flanco (mm)
$VB_{MAX}$	Desgaste de Flanco Máximo (mm)
$v_c$	Velocidade de Corte (m/min)
$v_{ch}$	Velocidade de Saida do Cavaco (m/s)
$v_e$	Velocidade Efetiva (m/min)
$v_f$	Velocidade de Avanço (mm/min)
$W$	Desgaste de Quina (mm)
$y_b$	Profundidade de Penetração da Escova (mm)

## RESUMO

O processo de furação é de extrema importância dentro da área da usinagem, pois representa cerca de 25% entre todos os processos de usinagem existentes. Suas condições de corte são adversas, que levam a necessidade de estudos a respeito do aumento do desempenho da ferramenta. Porém, o foco geralmente era sobre a alteração das características macrogeometria da ferramenta, enquanto a microgeometria não era analisada da maneira adequada, dada pela falta de equipamentos para tal fim e pela ausência de parâmetros de caracterização. Ao longo dos anos foi visto que modificações performadas na microgeometria da ferramenta por meio da remoção de material da superfície do gume de corte, alteram a sua condição. Este processo é chamado de tratamento de gume, no qual as características e os parâmetros empregados alteram o tamanho formato do arredondamento do gume, bem como o desempenho da ferramenta de corte. Isto posto, este trabalho avaliou o efeito do tratamento de gume pelo processo de escovamento com polimento sobre a vida e comportamento de desgaste de brocas helicoidais de metal-duro na furação do aço AISI P20. As brocas possuem dois gumes de corte, são revestidas e possuem furos para refrigeração com fluido interno. Para o teste foram utilizadas duas condições microgeometrias das brocas: sem tratamento (STD) e tratamento por escovamento com polimento (EP). As outras condições de usinagem como o fluido lubrificante, parâmetros de corte e corpo de prova permaneceram inalteradas ao longo do ensaio. Equipamentos fundamentais como a mensuração óptica 3D (Alicona), microscópio eletrônico de varredura (MEV) e o estereoscópio foram empregados no ensaio. Para avaliar o desempenho das brocas, foi instaurado um critério de final de vida para o desgaste de flanco  $VB_{MAX} = 0,3$  mm e/ou lascamentos no gume com o mesmo valor. Em conjunto, um critério que limita o final do teste foi estabelecido no total de 1000 furos. Sobre a microgeometria resultante, foi visto que a ferramenta sem tratamento (STD) exibiu defeitos como microlascamentos e rebarbas, ao longo do gume, que possuiu 9  $\mu$ m de raio. Já a ferramenta que foi escovada (EP) resultou em um raio de 19  $\mu$ m, que exibiu uma microgeometria homogênea e sem defeitos. Isto impactou diretamente no desempenho da ferramenta, pois o comportamento de desgaste da broca escovada foi regular, que atingiu somente  $VB_{MAX} = 0,16$  mm em 1000 furos, enquanto a sem tratamento foi decretado seu fim de vida em 500 furos por lascamentos e entalhes no gume superiores a 0,3 mm. Ambas as ferramentas experienciaram os mesmos mecanismos de desgaste por abrasão e adesão, mas mais controlados por parte da broca escovada. Por fim, a broca escovada apresentou um incremento na vida em mais de 51% ao comparado com a condição sem tratamento, para um mesmo desgaste de flanco  $VB_{MAX} = 0,1$  mm. Estes fatores comprovaram a eficácia do processo de escovamento com polimento no tratamento do gume de ferramentas de corte.

**Palavras-chave:** Furação, Microgeometria, Escovamento, Desgaste, AISI P20

## ABSTRACT

The drilling process is extremely important in the machining field, as it accounts for around 25% of all existing machining processes. Its cutting conditions are adverse, which leads to the need for studies to enhance tool performance. However, the emphasis was on altering the macrogeometry characteristics of the tool, while the microgeometry was not sufficiently analyzed, given the unavailability of equipment for this purpose and the absence of characterization parameters. Over the years, it has been observed that modifications to the microgeometry of the tool, specifically the removal of material from the surface of the cutting edge, result in a subsequent alteration to its condition. This process is designated as cutting edge preparation, wherein the characteristics and parameters employed affect the size and shape of the edge rounding, as well as the performance of the cutting tool. That said, this work evaluated the effect of cutting edge preparation by means of brushing in the tool life and wear behavior of cemented carbide twist drills on machining of AISI P20 steel. The drills have two cutting edges, coating and internal coolant holes. For the experimental tests, two microgeometry conditions were tested: no edge preparation (STD) and edge preparation by brushing-polishing (EP). Other machining conditions such as cutting parameters, coolant condition and the workpiece remained unchanged throughout the test. Fundamental equipment such as 3D optical metrology measurement ( Alicona), scanning electron microscope (SEM) and a stereoscope were used in the experiment. To assess the cutting tools performance, an end of life criterion was employed for flank wear  $VB_{MAX} = 0,3$  mm and/or edge chipping with the same value. Together, an end-of-test criterion was established up to 1000 holes. For the resulted microgeometry, the untreated tool (STD) exhibit defects as chipping and burrs all along the cutting edge, with a radius of  $9\ \mu\text{m}$ . In turn, the brushed drill (EP) has an edge radius of  $19\ \mu\text{m}$ , and the previous defects were eliminated, generating a homogeneous microgeometry. This directly impacted the tool performance, since the wear behavior for the EP drill was consistent during the 1000 holes, only reaching  $VB_{MAX} = 0,16$  mm, as the STD drill ended the test due to chipping on the cutting edge superior to  $0,3$  mm. Both tools experienced the same wear mechanisms of abrasion and adhesion, but in the EP condition adequately controlled it. To conclude, the brushed drill increases the tool life more than 50% in comparison to the STD condition, to the same flank wear of  $VB_{MAX} = 0,1$  mm, corroborating to the effectiveness of the brushing process.

**Keywords:** Drilling, Microgeometry, Brushing, Tool Wear, AISI P20

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de ferramentas de corte é notada desde os tempos mais remotos da humanidade. Durante o período paleolítico, o homem primitivo confeccionava, de forma rudimentar, as ferramentas com um gume de corte em lascas de pedra para satisfazer suas necessidades básicas, nomeadamente a caça, alimentação e a defesa. Com o advento da extração dos metais e as contínuas melhorias nos processos de fundição no século XVII, o ferro e o aço passaram a figurar como os principais materiais de construção. A partir da Revolução Industrial, no início do século XIX, emergiu a necessidade de investigação de novos materiais para a produção de ferramentas de corte que pudessem responder às novas exigências dos processos produtivos. Portanto, no final do século XIX, Taylor desenvolveu o aço-rápido, que representou um avanço significativo em materiais para ferramentas de corte e revolucionou o domínio dos processos de fabricação. O progresso contínuo nesta área, através de pesquisas e desenvolvimentos, resultou na criação do metal-duro (carboneto de tungstênio) em 1923, por Schröter, assim como no emprego das cerâmicas na produção de ferramentas de corte em 1938, por Osenberg, como por Wentorf, no desenvolvimento de um material de altíssima dureza, chamado de CBN (nitreto de boro cúbico) em 1956, utilizado para a usinagem material endurecidos (KLOCKE, 2018).

O desenvolvimento na área de ferramentas de corte foi constante ao longo do tempo, e trouxe avanços importantes para a área de processos de fabricação. Assim, a evolução e a busca por melhorias nos processos dentro de uma cadeia produtiva se faz extremamente necessária. Porém, no atual mundo globalizado, bem como na área da usinagem, se trabalha com uma escassez de tempo e recursos, o que implica em um maior controle dos requerimentos fabris e tolerâncias mais rigorosas. Isto exige de processos que compactuem com essas necessidades. Por estes motivos, é de interesse da indústria o desenvolvimento de novas técnicas e pesquisas, que propiciem como resultado um melhor aproveitamento dos recursos alocados e dos tempos de produção. Este é um assunto recorrente, por conta de inúmeros aspectos podem ser aprimorados durante o processo, como a otimização das condições de corte, melhoria do substrato a ser usinado, características geométricas da ferramenta de corte. O principal objetivo é o incremento de desempenho da ferramenta de corte.

A forma que se é utilizada a ferramenta de corte é um fator chave para que se obtenha uma produtividade desejada. Autores como Davim (2016), indicam que a geometria correta para tal processo somente é selecionada em 30% das operações. Já em 48% das vezes a

ferramenta é utilizada de acordo com os parâmetros de corte adequados, e somente 57% das ferramentas são utilizadas até a sua capacidade máxima de desempenho. Esta relativa baixa eficiência da ferramenta, dado pelo seu uso inadequado, ainda é um desafio a ser superado dentro da área de usinagem. Portanto, são utilizados vários artifícios que possibilitem melhorar a vida de uma ferramenta de corte. Para tal fim, as pesquisas nos últimos tempos são voltadas principalmente para o desenvolvimento de quatro aspectos de uma ferramenta de corte: novos substratos, tecnologia de revestimentos, características geométricas e o tratamento de gume (DAVIM, 2016; RODRÍGUEZ, 2009; KLOCKE, 2018; STEMMER, 2005a; DENKENA; BIERMANN, 2014; TIKAL, 2009; ZHUANG *et al.*, 2021).

O tratamento de gume, diferente dos demais aspectos que foram aprimorado ao longo de inúmeras décadas, a partir do início dos anos 2000 que se iniciaram pesquisas focadas nesta área de tratamento de gume, muito por conta por falta de equipamentos adequados que permitissem uma melhor compreensão do seu estado e o impacto gerado no processo de usinagem. Percebeu-se que era poderia aumentar o desempenho da ferramenta de corte através da alteração da microgeometria do gume. Para tal, processos de usinagens já existentes foram adaptados e aprimorados, no qual este processo foi chamado de tratamento de gume (DENKENA *et al.*, 2002; BYRNE *et al.*, 2003; TIKAL; 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014; ZHUANG *et al.*, 2021).

Portanto, o tema deste trabalho vai ao encontro com esta necessidade, que é a de melhorar o desempenho da ferramenta de corte por meio do tratamento de gume. Com base na abordagem deste trabalho, é possível correlacionar com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015). Dentre os 17 objetivos, os que estão contemplados neste trabalho são o 8º e o 9º, que correspondem ao trabalhos descente e crescimento econômico, e indústria, inovação e infraestrutura, respectivamente.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os processos de usinagem cada vez mais levam em consideração os custos englobados e o tempo de processo. Por esse motivo, são utilizados alguns métodos como: monitoramento do processo por uso de sensores e sinais, otimização dos parâmetros de corte, cálculo da hora-máquina, métodos de planejamento do processo e ferramentaria. Portanto, essas avaliações feitas possibilitam a implementação de melhorias dentro de um processo específico (KLOCKE, 2018; WEGENER *et al.*, 2016).

Inseridas no contexto de usinagem, estão as ferramentas de corte, que efetivamente são encarregadas da transformação de um corpo de prova através da remoção de material indesejado. Apesar do seu custo frente a outros custos da cadeia produtiva ser pequeno, na faixa de 3-7% do custo total, seu impacto é muito expressivo. Sobre o processo de furação, responsável pela geração de cavidades, a ferramenta mais utilizada para este fim é a broca helicoidal. Ela possui vários desafios relacionados ao processo de usinagem, por conta de diversos fatores desfavoráveis, como a mecânica do corte que não favorece a expulsão do cavaco para fora da cavidade do furo, bem como a chegada de fluido na região do corte. Além disto, os desgastes do gume e da guia são elevados, dado pelo elevado atrito no corte. Isto faz com que as temperaturas envolvidas no processo sejam um fator a ser considerado na hora do processo de furação. Estudar mais a fundo estes aspectos traz benefícios diretos no desempenho da ferramenta (KLOCKE, 2018; FRIEMUTH, 2002; TÖNSHOFF *et al.*, 1994).

Do custo total de fabricação de uma ferramenta de corte, entre 45-60% é correspondido ao processo de retificação, que é responsável pela geração da geometria desejada da ferramenta de corte. Mesmo com o aprimoramento ao longo dos anos, o processo de fabricação da ferramenta de corte ainda gera defeitos, principalmente no gume, como microlascamentos, alta rugosidade e imperfeições. Foi percebido que a relação direta destes defeitos se dá com o desempenho desta ferramenta de corte, por conta da baixa resistência mecânica durante o corte e pelas questões tribológicas envolvidas serem irregulares (FRIEMUTH, 2002; BYRNE *et al.*, 2003; DENKENA; BIERMANN, 2014; TIKAL; 2009; DENKENA *et al.*, 2012a; BASSET *et al.*, 2012).

Desta forma, se fez crucial a criação de um processo subsequente ao de retificação, com a finalidade de reduzir ou até eliminar os defeitos presentes no gume. Este processo recebeu a denominação de tratamento de gume. O objetivo primário consiste em otimizar os elementos que condicionam o desempenho da ferramenta, mediante a modificação da microgeometria do gume. Isto é realizado por meio da remoção de material do gume da ferramenta, que gera um certo arredondamento e conseqüentemente um aumento do raio do gume. Ele corresponde à aproximadamente 10-15% do valor total do custo de fabricação da ferramenta. Por isto, o custo desse processo é relativamente baixo frente ao possível benefício no desempenho da ferramenta, que a deixa mais competitiva e confiável (TIKAL, 2009; BYRNE *et al.*, 2003; RODRÍGUEZ, 2009; KLOCKE, 2018; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Se bem executado, o tratamento de gume melhora questões referentes a ferramenta de corte e a peça usinada. Alguns autores indicam que as ferramentas de corte que passaram pelo tratamento de gume resultaram em um incremento da vida da ferramenta, se comparadas com

ferramentas sem tratamento. O comportamento de desgaste destas ferramentas também se mostrou mais controlado. Dependendo de alguns fatores como parâmetros de corte, material usinado, uso de fluido e principalmente o tamanho do raio do gume, essa melhora pode ficar entre 5 % até 400 % na vida da ferramenta. Além disso, foi notado que a qualidade da peça usinada e a superfície do gume aumentam. Isto resulta em uma maior produtividade, confiabilidade e previsibilidade do processo como um todo (DENKENA; BIERMANN, 2014; WANG *et al.*, 2020; BIERMANN *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2013; BIERMANN; TERWEY, 2008; BOUZAKIS *et al.*, 2014; DENKENA *et al.*, 2020; BOUZAKIS *et al.*, 2017).

Nos últimos anos, o foco da pesquisa se dá no aprimoramento e desenvolvimento de novas técnicas como as de combinações de tratamento de gume, para gerar diferentes microgeometrias e microtopografias. Em conjunto, análises sobre a vida das ferramentas em condições adversas ainda são pesquisadas. O efeito do arredondamento e seu formato, em diferentes processos também é um tópico recorrente (DENKENA *et al.*, 2019; DENKENA *et al.*, 2020; BIERMANN *et al.*, 2021; ZHOU *et al.*, 2023; HARTIG, 2025; NARDY *et al.*, 2024; MEIJNER *et al.*, 2024; ZHOU *et al.*, 2025; VOPÁT *et al.*, 2024; MALEKAN *et al.*, 2024).

Diversos autores realizaram estudos sobre o tratamento de gume, em sua maioria nas fresas e insertos. No caso das brocas no entanto, esse número de publicações é consideravelmente reduzido, fato dado pelo processo de furação possuir mais dificuldades e particularidades na mecânica do corte principalmente em material de difícil usinagem, além de um maior consumo de corpos de prova na realização dos ensaios. Portanto, o objetivo deste trabalho é a comparação do efeito do tratamento de gume por escovagem aplicado em brocas helicoidais de metal-duro na furação de um aço para moldes. Isso abre espaço pra uma avaliação e um melhor entendimento do impacto do tratamento de gume no desempenho das brocas helicoidais de metal-duro.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve o objetivo de compreender o efeito do tratamento do gume pelo processo de escovamento sobre a vida e o comportamento de desgaste de brocas helicoidais de metal-duro na furação do aço AISI P20.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral seja atingido, foi subdividido nos seguintes objetivos específicos:

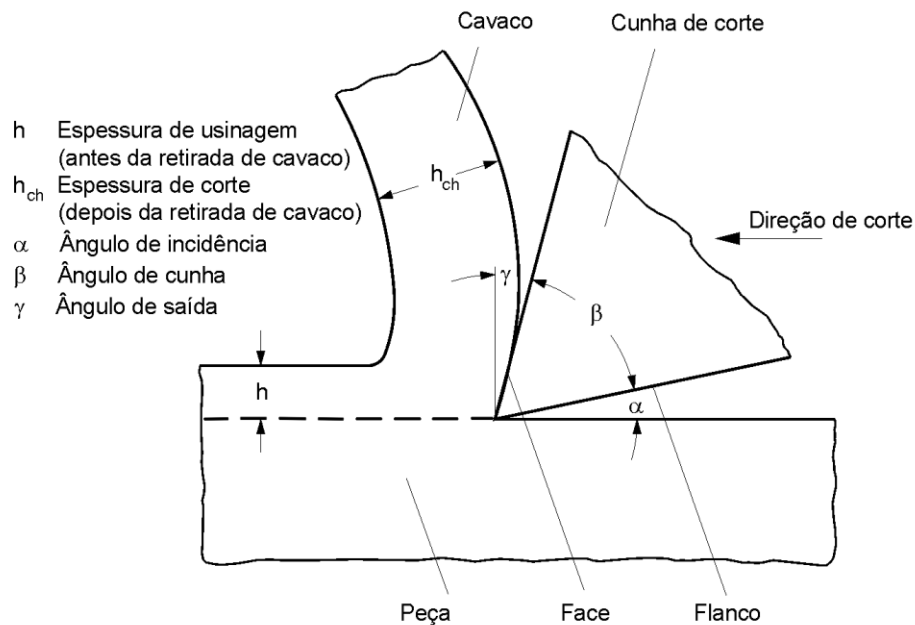
- a) Caracterizar as ferramentas de corte a respeito da macrogeometria, mesogeometria e microgeometria;
- b) Analisar a influência do tratamento de gume por escovamento na microgeometria da ferramenta de corte;
- c) Avaliar o efeito do tratamento de gume por escovamento sobre o comportamento de desgaste e a vida da ferramenta de corte;
- d) Verificar os mecanismos e tipos de desgastes presentes nas ferramentas de corte;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi apresentado o referencial teórico que contempla o estudo feito no presente trabalho.

#### 3.1 MECÂNICA DO CORTE

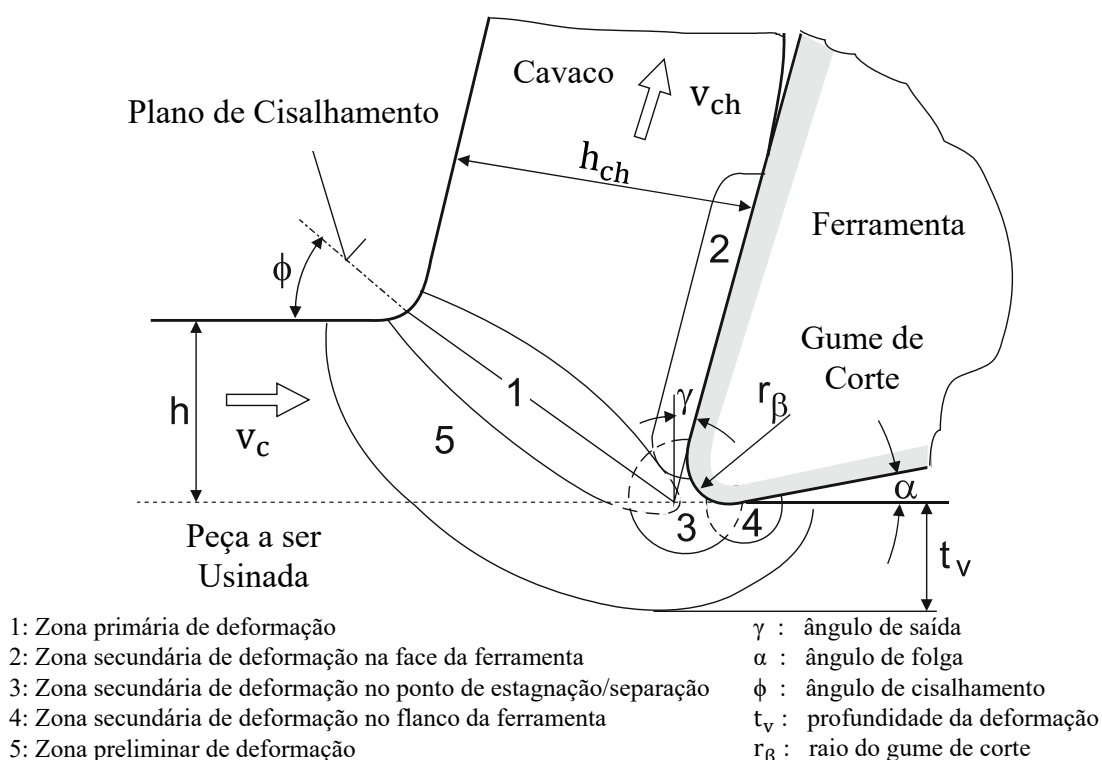
Conforme a norma DIN 8580 (2003), usinagem são todos os processos englobados no terceiro grupo “corte”, que alteram a forma da peça por meio da remoção de material devido ao movimento da ferramenta em relação a peça. O resultado dessa interação mecânica entre peça-ferramenta, produto da remoção de material, é chamado de cavaco, visto na Figura 1 (KÖNIG; KLOCKE, 1997; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; MACHADO *et al.*, 2009; FERRARESI, 2003; STEMMER, 2005a; CHATTI *et al.*, 2019; YOUSSEF, 2008).



**Figura 1.** Mecanismo ideal de formação do cavaco (Adaptado de KÖNIG; KLOCKE, 1997).

Quando se inicia o corte, o gume da ferramenta penetra no material da peça, que gera neste uma deformação elástica, e subsequente plástica. Essa deformação acontece até que o material chegue no seu limite máximo de cisalhamento. A partir disto, ele inicia o processo de escoamento. Esse material é transportado pela face da ferramenta para fora da região do corte. Por conta das prévias deformações experienciadas no corte, o cavaco é caracterizado por possuir um formato irregular (KLOCKE, 2011; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; STEMMER, 2005a; CHATTI *et al.*, 2019; MACHADO *et al.*, 2009; FERRARESI, 2003).

Pela representação da Figura 2 é possível visualizar as zonas de formação do cavaco. A maior parte da deformação plástica é concentrada na zona primária de cisalhamento (1). Nas zonas secundárias de cisalhamento na face (2) e no flanco (4), o material da peça sofre mais uma parcela de deformação por conta das altas forças de atrito, que resulta em temperaturas elevadas na face e flanco da ferramenta. A zona secundária de cisalhamento na zona de estagnação/separação (3) ocorre no gume da ferramenta em contato com o material da peça, visto que pressões no local são altas e neste ponto acontece a separação do material da peça. Por fim, na zona de deformação preliminar (5) o material é levemente deformado plasticamente, e ela apresenta influência na profundidade de penetração da deformação plástica na superfície da peça usinada (TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; KLOCKE, 2018).



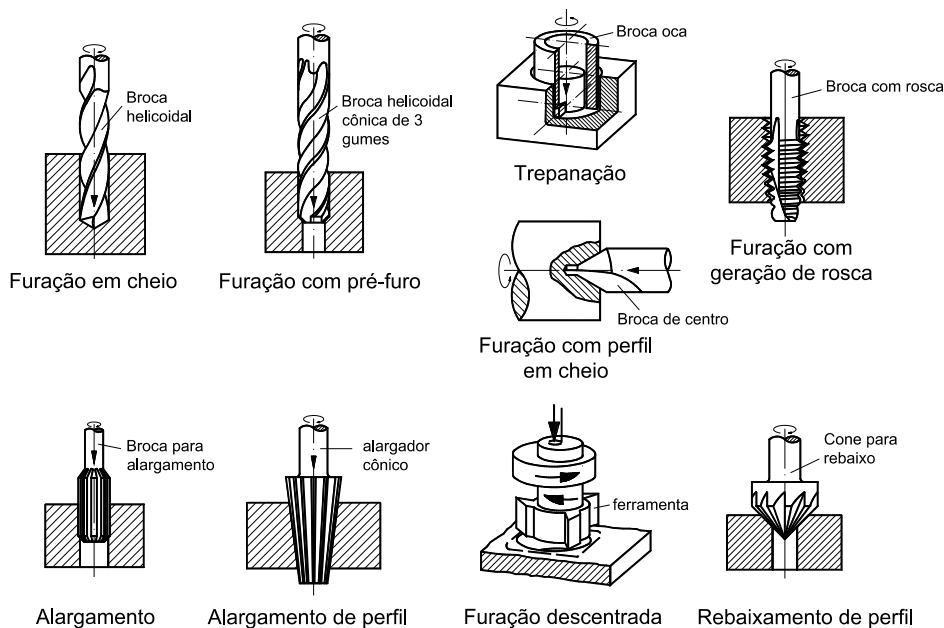
**Figura 2.** Zonas de formação do cavaco (Adaptado de TÖNSHOFF; DENKENA, 2013)

Dependendo das condições de usinagem e do material usinado, os níveis de deformação serão diferentes, os quais geram formatos de cavacos diferentes. Dessa forma, os cavacos podem ser categorizados de contínuo, lamelar, segmentado e descontínuo. A forma do cavaco pode indicar ainda se o casamento das condições de usinagem com o material usinado é favorável. A verificação e alteração desses fatores, caso necessário, é importante para melhorar alguns aspectos como a segurança do processo, operador e os parâmetros de usinagem (TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; KLOCKE, 2011; STEMMER, 2005a).

Existem diversos processos de usinagem, e eles podem ser classificados a partir da sua geometria do gume. Processos cujo gume possui a geometria definida são os mais usuais na indústria como o torneamento, furação, fresamento, escovamento, planeamento, serramento, alargamento, entre outros (DIN 8580, 2003; KLOCKE, 2018; FERRARESI, 2003; MACHADO *et al.*, 2009; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; STEMMER, 2005a).

### 3.2 FURAÇÃO

Pela normativa DIN 8589-2 (2003), define furação como um processo de usinagem cujo movimento de corte se dá de forma circular. Outra característica é que a rotação da ferramenta ocorre somente em volta da direção (eixo) no qual acontece o movimento de avanço. Assim como o torneamento, ele é um processo de usinagem na qual o corte ocorre de forma contínua. Este processo possui algumas variações, como o rebaixamento, geração de rosca, furação em cheio, alargamento e furação descentrada, vide Figura 3 (KLOCKE, 2011; DIN 8589-2, 2003; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; STEMMER, 2005b; MACHADO *et al.*, 2009).



**Figura 3.** Variantes do processo de furação de acordo com a DIN 8589-2 (Adaptado de KÖNIG; KLOCKE, 1997).

As operações de furação possuem algumas características e particularidades como: (TÖNSHOFF *et al.*, 1994; KÖNIG; KLOCKE, 1997; STEMMER, 2005b).

- a) Dificuldade no escoamento dos cavacos para fora da cavidade, com o aumento da profundidade do furo aumenta-se a dificuldade.
- b) Velocidade de corte varia com o raio da broca, ela é zero no centro e atinge seu

valor máximo na periferia da broca.

- c) Distribuição de calor desigual no ponto de contato.
- d) Atrito das guias na parede do furo.
- e) Elevado desgaste no gume de corte.
- f) Dificuldade da chegada do fluido lubrificante com o aumento da profundidade da furação, necessitando de medidas alternativas (canais de lubrificação interno na broca).

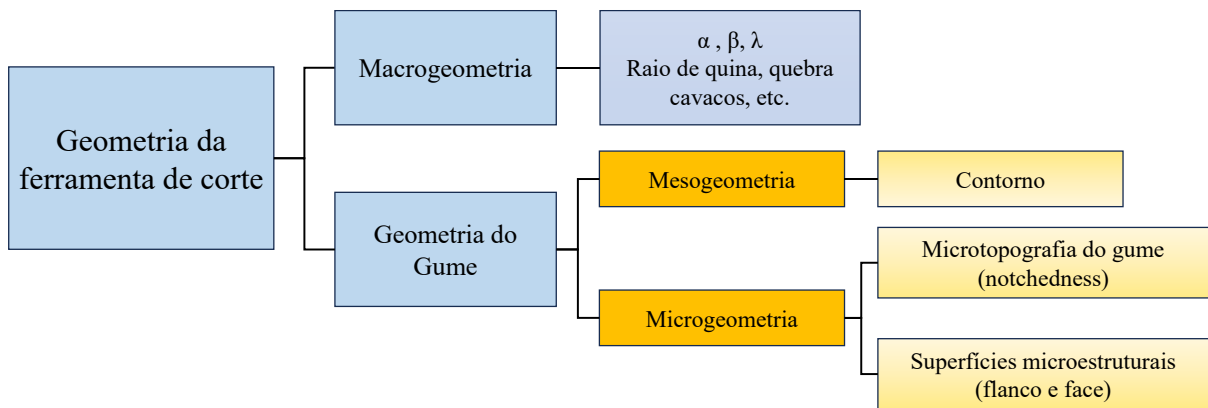
Os diferentes processos de furação advieram de necessidades quanto a tolerância dimensional dos furos, profundidade da furação, qualidade superficial e potência de usinagem. Além disso, se tem uma crescente no desenvolvimento de métodos analíticos, que visam calcular os esforços resultantes nas brocas. Portanto, é de suma importância o entendimento da geometria da broca, bem como a cinemática do corte envolvida no processo de furação e os efeitos dos fatores mais influentes sobre o comportamento do processo (KLOCKE, 2018).

### 3.2.1 Broca helicoidal

Nos processos de furação, a broca helicoidal ocupa uma posição relevante. Ela é muito utilizada para a geração de furos cilíndricos, principalmente do tipo furação em cheio de materiais sólidos. Além disto, ela serve como meio de aumentar o diâmetro de furos previamente efetuados. É estimado que a broca helicoidal faça parte de 20 a 25 % do total de processos de usinagem na atualidade. Por isto, é a ferramenta de usinagem mais fabricada e propagada (KLOCKE, 2018; TÖNSHOFF *et al.*, 1994).

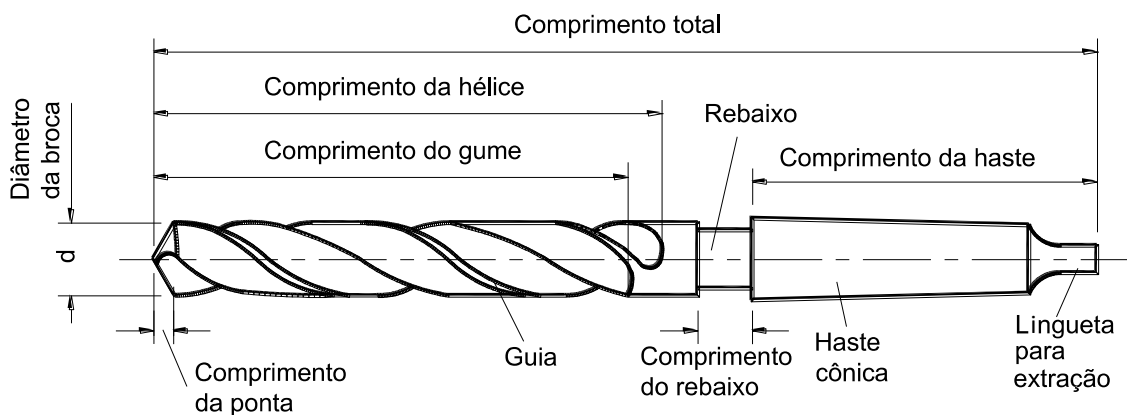
Um aspecto importante de uma ferramenta de corte é como a sua geometria impacta diretamente em características do processo como o desgaste, forças de corte, qualidade superficial da peça usinada, formação e escoamento de cavaco. O estudo mais aprofundado da geometria leva ao aprimoramento da ferramenta, que pode ser ajustada de acordo com os requerimentos do material que será usinado, material da ferramenta de corte e as próprias condições de usinagem (KLOCKE, 2018; STEMMER, 2005b; TÖNSHOFF *et al.*, 1994).

A geometria de uma ferramenta de corte de precisão, como a broca helicoidal, pode ser dividida em macrogeometria e geometria do gume, esta última sendo subdividida em mesogeometria e microgeometria, de acordo com a Figura 4 (RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA *et al.*, 2005; DENKENA; BIERMANN, 2014; TIKAL, 2009).



**Figura 4.** Particularidades da geometria de uma ferramenta de corte (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009).

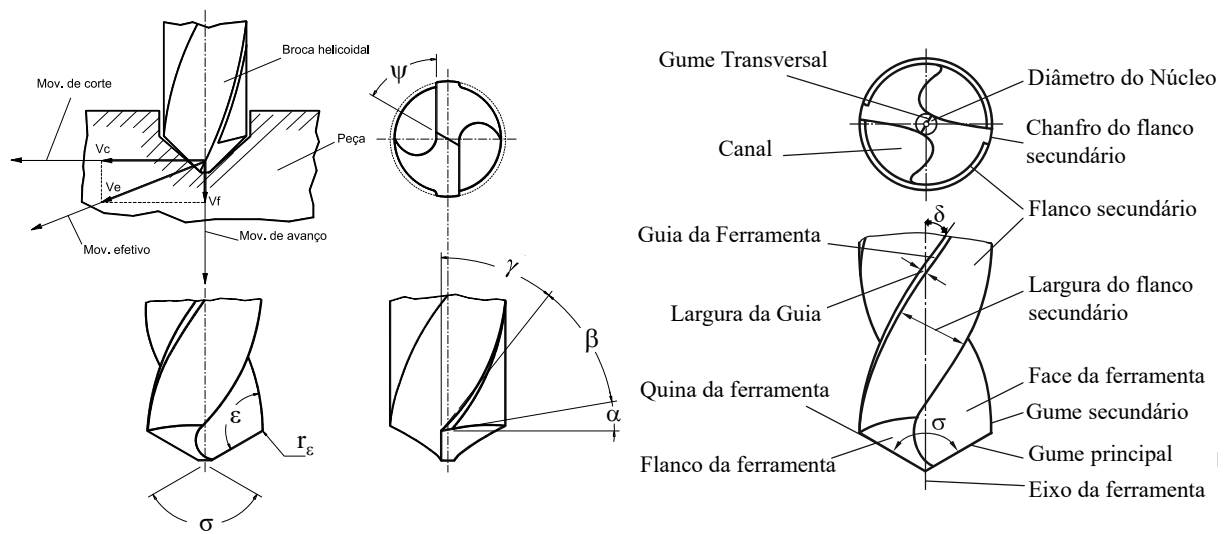
Quanto a questão macrogeométrica da broca helicoidal, de uma forma resumida, é constituída por uma parte cortante (comprimento do gume) e uma haste, como visto pela Figura 5 (KLOCKE, 2018; RODRÍGUEZ, 2009; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013).



**Figura 5.** Broca helicoidal com haste cônica segundo a norma DIN 1412 (Adaptado de KLOCKE, 2011).

A macrogeometria de uma ferramenta de corte, como a broca helicoidal, inclui os principais ângulos como os de cunha, saída, incidência, quina e de ponta. Além disto, é composta de quebra cavacos, raio de quina, além das outras superfícies funcionais e características geométricas ligadas a refrigeração, lubrificação e ao escoamento do cavaco, vistas na Figura 6 (KÖNIG; KLOCKE, 1997; RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA *et al.*, 2005).

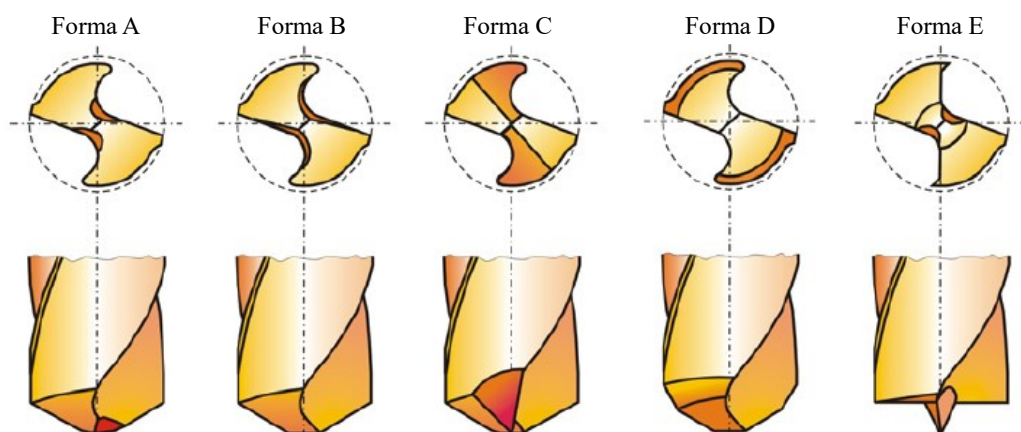
As principais seções macrogeométricas estão ligadas ao gume transversal, gumes principal e secundário, face e flanco, guia e canal da broca. O gume transversal inicia a deformação do material, o extrudando para o gume principal. No gume principal, ocorre efetivamente o corte do material usinado, transportado pela face da ferramenta segue para o canal da broca até a sua saída do furo (KLOCKE, 2018; STEMMER, 2005a).



$\alpha$  = ângulo de incidência     $\beta$  = ângulo de cunha     $\gamma$  = ângulo de saída     $\sigma$  = ângulo de ponta  
 $\epsilon$  = ângulo de quina     $\psi$  = ângulo do gume transversal     $r_\epsilon$  = raio de quina     $\delta$  = ângulo de hélice  
 $V_c$  = velocidade de corte     $V_f$  = velocidade de avanço     $V_e$  = velocidade efetiva

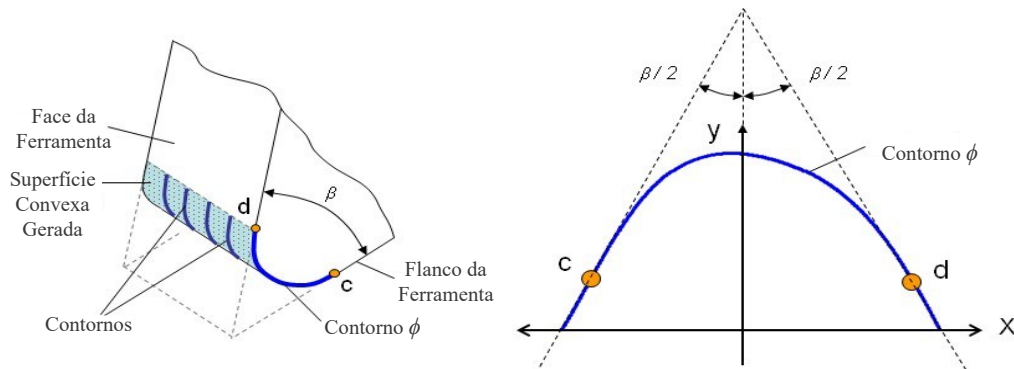
**Figura 6.** Macrogeometria de uma broca helicoidal de acordo com a DIN 8589-2 (Adaptado de STEMMER, 2005a; KLEIN, 1975; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; KLOCKE, 2018).

O gume de uma broca helicoidal é complexo, por este motivo, uma pequena alteração na sua macrogeometria faz com que broca seja adaptada para diferentes aplicações. Existem diferentes formas macrogeométricas para uma broca helicoidal, que são mais de 150 formas de afiação de brocas e vários perfis específicos, visualizados na Figura 7. Levam primariamente em consideração fatores como o tipo do material a ser usinado e suas propriedades mecânicas, condições de furação, qualidade dimensional e superficial, além do desgaste da ferramenta. Todos estes fatores são importantes para garantir qualidade e desempenho adequados a função desempenhada pela broca helicoidal (KÖNIG; KLOCKE, 1997; STEMMER, 2005b; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; PAUCKSCH *et al.*, 2008; SCHMIER, 2004).



**Figura 7.** Diferentes macrogeometrias geradas a partir de formas especiais de afiações de brocas, seguindo a norma DIN 1412 (Adaptado de SCHMIER, 2004).

A respeito da mesogeometria, são englobados os contornos que correspondem a superfície convexa no gume, e sua ordem de grandeza é na faixa de 1-100  $\mu\text{m}$ . A geometria do contorno usualmente é demonstrada como o arredondamento do gume. Pela Figura 8 é possível visualizar um contorno característico  $\phi$ , e que este contorno geralmente não possui o formato de arco de circunferência perfeito. A descrição do arredondamento pode ser feita em termos nominais por meio de um raio médio  $r_\beta$  (RODRÍGUEZ, 2009; RECH *et al.*, 2005).

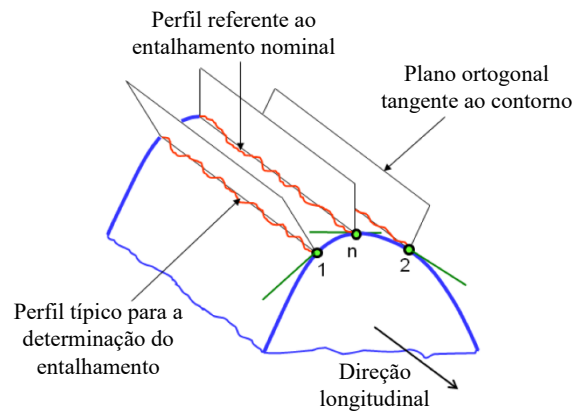


**Figura 8.** Superfície convexa e contorno gerados (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009).

A caracterização da geometria do contorno  $\phi$  deve ser expressa por uma série de parâmetros que permitam uma descrição orientada do mesmo, visando processos de usinagem. Os pontos  $c$  e  $d$  representam a união entre o contorno  $\phi$ , o flanco e face da ferramenta, respectivamente, com a finalidade de descrever o arredondamento do gume (RODRÍGUEZ, 2009).

Referente a microgeometria, é descrito pela definição geométrica da parte ativa da ferramenta de corte cuja ordem de grandeza é inferior a 2  $\mu\text{m}$ . Define o formato do gume, engloba a microtopografia do gume e a microtopografia da superfície da face e do flanco na periferia do gume. A quantificação dos entalhes e dos desnivelamentos da microtopografia na superfície do gume é chamada de entalhamento, proveniente do termo inglês *notchedness*. Ele é originado a partir de diversas razões ligadas diretamente com o processo de fabricação da ferramenta, como o substrato (tamanho de grão, propriedades mecânicas e térmicas), a macrogeometria da ferramenta (ângulo  $\beta$  e o formato do gume) e o método de fabricação da ferramenta (tipo do rebolo, abrasivo, velocidades e direções de retificação) (RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014; DENKENA *et al.*, 2005; RECH *et al.*, 2005).

A descrição da caracterização do entalhamento pode ser vista pela Figura 9. Ela é feita por meio do plano ortogonal até a tangente do contorno do gume no ponto de interesse. O entalhamento nominal é representado pelo ponto  $n$ , que é o mais protuberante no contorno do gume, e os pontos 1 e 2 simbolizam as extremidades do contorno efetivo (RODRÍGUEZ, 2009).



**Figura 9.** Caracterização dos entalhamentos “notchedness” (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009).

Durante muitos anos, o incremento do desempenho das ferramentas de corte era feito através da otimização da macrogeometria da ferramenta, material da ferramenta e seu revestimento. Os requerimentos fabris e tolerâncias estreitas exigiram uma análise mais concisa de aspectos que não estavam otimizados, como a geometria do gume. O objetivo da otimização da geometria do gume é para aumentar as propriedades mecânicas e a qualidade do gume da ferramenta. Por ser muito suscetível ao desgaste, existem processos que são aplicados ao gume para alterar a sua microgeometria e mesogeometria, e otimizá-las, para incrementar o desempenho da ferramenta (BYRNE *et al.*, 2003; DENKENA *et al.*, 2005; TIKAL, 2009).

### 3.3 TRATAMENTO DE GUME

Nos últimos tempos, para a fabricação de produtos provenientes de processos de usinagem com geometria do gume definida, é essencial atingir certas especificações do produto e requerimentos fabris, como tolerâncias dimensionais, integridade superficial, qualidade final do produto dentre outros aspectos. Assim, faz-se necessário procedimentos que consigam melhorar as características da ferramenta e do processo de usinagem a um baixo custo relativo, e de fácil implementação. Sobre a ferramenta de corte, geralmente as melhorias eram empregadas no revestimento, macrogeometria e substrato. Nos últimos tempos, a melhoria que mais gera interesse na indústria é o tratamento de gume (RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014; TIKAL, 2009; DENKENA *et al.*, 2014a).

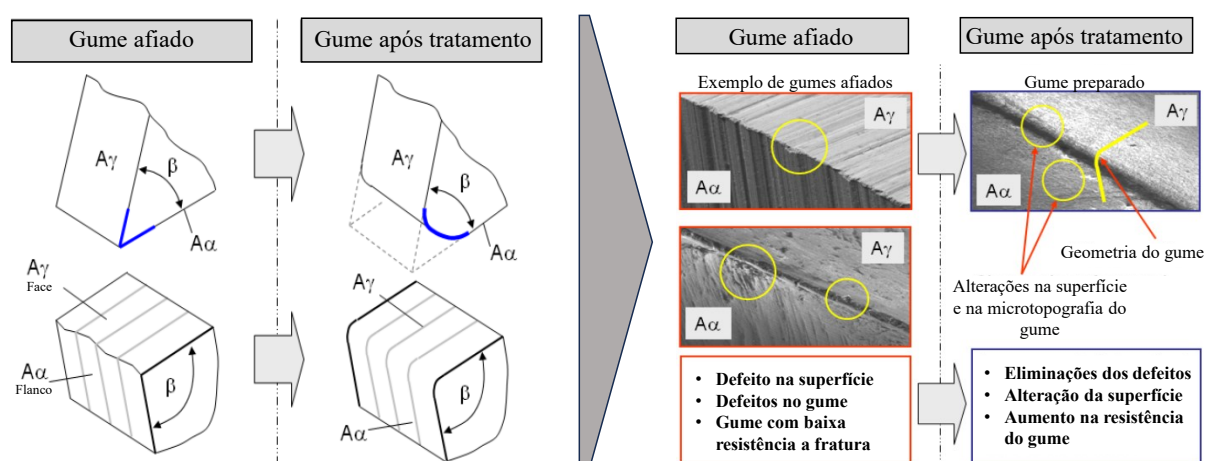
#### 3.3.1 Objetivos do tratamento de gume

O desempenho das ferramentas de corte é significativamente influenciado pela

microgeometria da ferramenta, pois o gume da ferramenta experiencia altas forças e temperaturas. Embora as ferramentas com um ângulo de saída positivo e gume afiado tenham uma boa capacidade de corte, a sua vida útil é curta. Além disso, ferramentas com gume afiado normalmente têm vários microdefeitos, tais como microlascamentos, microfissuras ou rebarbas, que conduzem a um elevado grau de rugosidade, instabilidade e fragilidade do gume. Isto aumenta o risco de lascamentos e quebras do gume, o que define o fim da vida útil da ferramenta. Além disso, são observados efeitos negativos na qualidade superficial da peça usinada com uma ferramenta que possui defeitos no gume (KLOCKE, 2018; RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014; DENKENA *et al.*, 2013).

Isso posto, o tratamento de gume consiste na alteração da microgeometria e microtopografia do gume de corte da ferramenta por meio da remoção de material. Como consequência, há uma alteração na rugosidade e textura do flanco e da face do gume, além da eliminação dos defeitos do gume como lascamentos e marcas geradas pelo processo de fabricação da ferramenta. O gume deixa de ser afiado com superfície irregular e passa ter um formato arredondado ou com chanfro (DENKENA; BIERMANN, 2014; RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA *et al.*, 2014a).

Os principais objetivos são aumentar a estabilidade do gume, melhorar o desempenho da ferramenta, incrementar a qualidade superficial da peça usinada e melhorar a adesão da camada de substrato em ferramentas revestidas, exemplificados na Figura 10 (RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014; RISSE, 2006; DENKENA *et al.*, 2002).



**Figura 10.** Esquema comparação do gume afiado com o gume pós preparação (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009).

Geralmente, o tratamento de gume é aplicado em substratos como o metal-duro. Materiais de ferramentas de corte de alta dureza como o nitreto de boro cubico (CBN),

cerâmicas e o diamante policristalino (PCD) também podem ser tratados, e em sua maioria, são empregados chanfros negativos no gume para a proteção contra lascamentos. O uso do gume com chanfros pode auxiliar no aumento da vida da ferramenta, apesar da utilização majoritária ser do gume com arredondamento. A aplicação principal é na usinagem de materiais de aços endurecidos (KLOCKE, 2018; ZHUANG *et al.*, 2021).

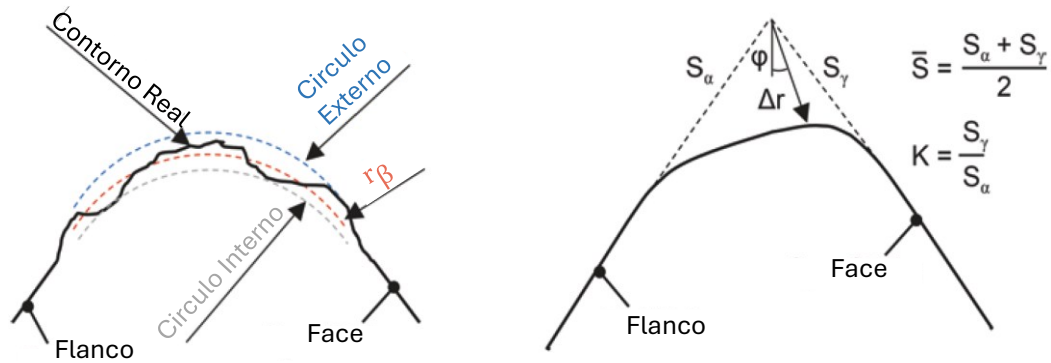
O aumento da estabilidade do gume influencia diretamente na elevação da confiabilidade da ferramenta, no aumento da vida útil e previsibilidade do desgaste da ferramenta. Estes fatores, particularmente na furação, torneamento e fresamento, são fundamentais em vista que são ferramentas muito utilizadas e exigidas em diversas severidades (DENKENA; BIERMANN, 2014; RODRÍGUEZ, 2009; TIKAL, 2009).

O processo de tratamento de gume é posterior ao de retificação, o último processo na fabricação das ferramentas. As ferramentas revestidas são normalmente pós-tratadas para reestruturar a superfície do revestimento. O arredondamento do gume nem sempre resultará um formato circular, portanto é necessário meios de descrever o formato gerado pelos processos de tratamento de gume, este último, será explicado na seção 3.3.3 (KLOCKE, 2018; RODRÍGUEZ, 2009; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013).

### 3.3.2 Formas de caracterização do gume

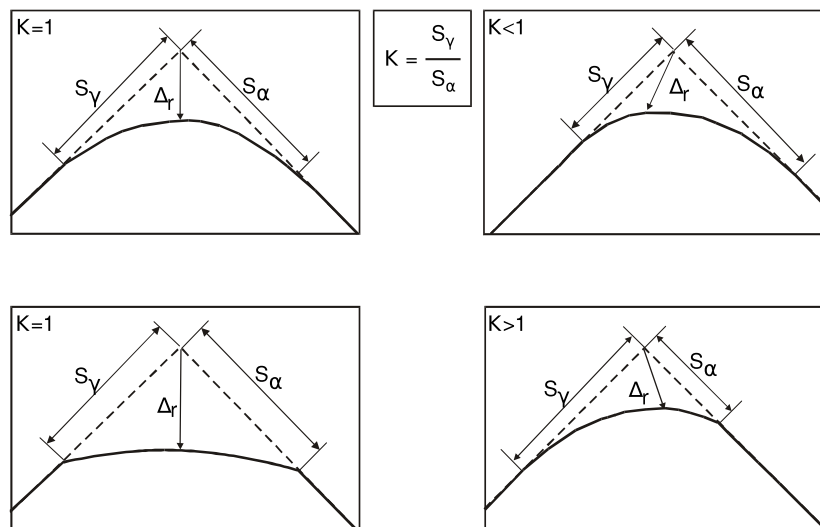
Assim que a geometria do gume é definida, sua influência no processo de usinagem pode ser determinada. De acordo com a norma DIN 6582 (1988), um gume de corte arredondado tem uma transição em forma de arco aproximadamente circular entre a face e o flanco da ferramenta. Inicialmente, ela pode ser caracterizada pelo raio médio  $r_\beta$ , medido no plano normal de corte  $P_n$  (KLOCKE, 2018; DENKENA; BIERMANN, 2014; DENKENA *et al.*, 2005).

No entanto, a descrição do gume que utiliza este valor de raio médio não é suficiente, uma vez que a transição da face para o flanco frequentemente se desvia de um contorno circular ideal. Denkena introduziu o método do fator de forma, também conhecido como método do fator K, em 2002. Definiu os parâmetros  $S_\alpha$ ,  $S_\gamma$ ,  $\bar{S}$ , o fator K, bem como a distância  $\Delta r$ , o ângulo  $\varphi$  e somou ao já existente  $r_\beta$  para melhor descrever a geometria do gume, vistos na Figura 11 (DENKENA *et al.*, 2002; BYRNE *et al.*, 2003; RISSE, 2006; RODRÍGUEZ, 2009; TIKAL, 2009; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; DENKENA; BIERMANN, 2014).



**Figura 11.** Definição do arredondamento do raio do gume de acordo com a DIN 6582 (esq.) e parâmetros de caracterização do gume de acordo com Denkena *et al.*, 2002 (dir.) (Adaptado de KLOCKE, 2018).

As seções do gume de corte  $S_\alpha$  e  $S_\gamma$  são definidas como a extensão virtual do flanco e face, respectivamente, até à ponta do gume de corte teoricamente ideal (afiado). A distância mais curta entre esta ponta ideal e a linha de contorno real é designada por  $\Delta r$ , enquanto o ângulo  $\varphi$  descreve o desvio do vetor de  $\Delta r$  em relação à vertical. O arredondamento médio  $\bar{S}$  caracteriza o tamanho do arredondamento como o valor médio de  $S_\gamma$  e  $S_\alpha$ . O fator de forma  $K$  caracteriza o desvio do contorno em relação ao contorno ideal, dado pela proporção de  $S_\gamma$  para  $S_\alpha$ . O fator  $K$  é exemplificado pela Figura 12 (DENKENA *et al.*, 2002; DENKENA *et al.*, 2005; RODRÍGUEZ, 2009; TIKAL, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014).



**Figura 12.** Classificação da geometria do gume conforme arredondamento (Adaptado de Denkena *et al.*, 2005).

Se a seção do flanco  $S_\alpha$  for maior do que a seção da face  $S_\gamma$ , ou seja, se o raio for deslocado para o flanco, será obtido um fator  $K < 1$  (geometria em cachoeira). Um deslocamento em direção à face do gume resulta em um fator  $K > 1$  (geometria de trompeta). Para um raio circular ideal, o resultado é um fator  $K = 1$  (DENKENA *et al.*, 2002; DENKENA *et al.*, 2005; RODRÍGUEZ, 2009; TIKAL, 2009; HECKMANN, 2010).

As formas assimétricas do gume ( $K \neq 1$ ) são cada vez mais utilizadas na indústria, visto o fato de que as diferentes formas alteram aspectos relacionados ao processo de usinagem como a força de corte, temperatura no gume, comportamento de desgaste e qualidade superficial. Usualmente, é feita uma distinção entre as formas, expressa por gumes afiados, chanfrados e arredondados, bem como uma combinação destas duas variantes, visto pela Figura 13. A geometria do gume arredondado depende diretamente do tratamento do gume, técnica utilizada e parâmetros do tratamento (HECKMANN, 2010; JÄCKEL *et al.*, 2025; HARTIG, 2025; DENKENA; BIERMANN, 2014).

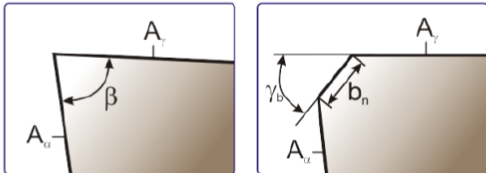
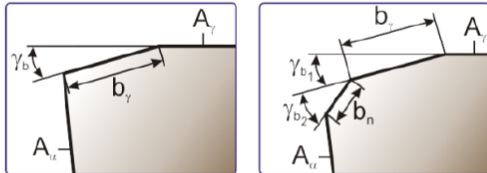
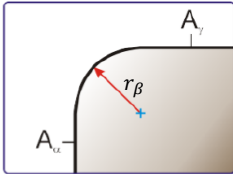
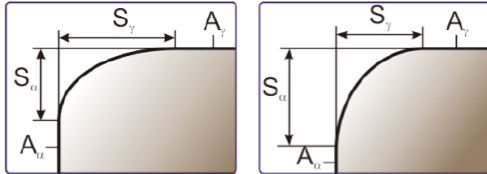
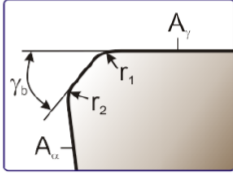
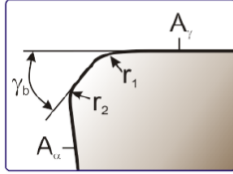
	Simétrico	Assimétrico
Afiado	 <p>Ideal Chanfro</p>	 <p>Chanfro Protetor Chanfro Duplo</p>
Arredondado	 <p>Raio Ideal</p>	 <p>Forma de Trompette Forma de Cachoeira</p>
Combinado	 <p>Arredondado + Chanfro (<math>r_1 = r_2</math>)</p>	 <p>Arredondado + Chanfro (<math>r_1 \neq r_2</math>)</p>

Figura 13. Geometrias típicas geradas pelo tratamento de gume (Adaptado de HECKMANN, 2010).

Porém, o método do fator de forma  $K$  proposto por Denkena em 2002 possui algumas desvantagens. A posição e a direção das tangentes usadas para medir  $S_\alpha$  e  $S_\gamma$  determinam a confiabilidade desse método. Essas tangentes são calculadas como linhas de regressão parciais de partes retas do flanco e da face da ferramenta, respectivamente. A precisão depende da quantidade e da localização dos pontos na face e no flanco usados para o cálculo das tangentes. A detecção aproximada do local do ponto de separação é um provável motivo da imprecisão, que deve ser considerada durante a medição. Além disso, a capacidade de caracterizar o perfil do flanco ou face com uma certa curvatura é limitada. O local de separação das tangentes  $S_\alpha$  e

$S_y$  depende muito da área de ajuste de uma determinada face que é usada para calcular a tangente. Atualmente, não há um padrão, e o resultado da medição é baseado na decisão do operador com relação à área de ajuste para as tangentes (WYEN *et al.*, 2012; DENKENA; BIERMANN, 2014; RODRÍGUEZ, 2009).

Rodríguez (2009) em sua pesquisa, descreve matematicamente a forma do gume, aproximada por um polinômio de sexto grau usando todos os pontos medidos. Com base nisso, um conjunto extenso de funções e parâmetros é analisado para caracterizar a forma do gume. Todavia, uma caracterização detalhada da transição entre a face e flanco é possível, mas a complexidade limita o uso prático. Além disso, a aproximação por um polinômio de sexto grau pode causar desvios significativos em comparação com o formato real do gume de corte (WYEN *et al.*, 2012; DENKENA; BIERMANN, 2014).

A dependência do operador é um fator dominante na incerteza da caracterização. Para resolver o problema, Wyen *et al.* (2012) desenvolveu um algoritmo iterativo que determina com mais precisão o ponto de separação entre a microgeometria da gume e a macrogeometria da ferramenta de corte. A forma do gume é caracterizada por um único raio  $r_\beta$  que usa todos os pontos medidos entre os pontos de separação da face e flanco para o ajuste. Devido a uma área de ajuste de círculo determinada com mais precisão, esse método fornece valores de raio do gume  $r_\beta$  que descrevem com mais exatidão a forma real do gume. Para considerar formas assimétricas, é introduzido o fator  $S_{wy}$ . Esse fator descreve o deslocamento do centro do círculo ajustado para a bissetriz do ângulo da cunha. Embora esse método ofereça uma detecção adequada para a separação da face, flanco e gume da ferramenta, a caracterização do formato do gume por um único raio ainda é uma simplificação (DENKENA; BIERMANN, 2014).

Para que seja efetiva a caracterização do gume, são necessárias algumas técnicas que possibilitem medições da forma geométrica na ordem micrométrica, e da topografia e rugosidade com precisão de 1  $\mu\text{m}$ . As formas de medição podem ser por meios de sensores tácteis ou sensores ópticos (WHITEHOUSE, 2002; TIKAL, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Sensores tácteis utilizam de uma agulha para fazer a medição da superfície. São restritos a medir uma pequena seção do perfil da ferramenta e altos tempos de medições. Já os sensores ópticos são mais utilizados, dada a sua rapidez na medição e abranger uma maior seção medida. Existem várias técnicas ópticas para medição do gume como: microscopia confocal cromática (CCM), interferometria, microscopia confocal de varredura a laser (CLSM). Vários autores consideram a profilometria 3D (MFPP) como a mais adequada para caracterizar o gume

de uma ferramenta. A medição por meio do MEV também é utilizada para medições precisas. Por estes fatores, nenhum destes métodos estão corretos ou errados em suas medições, pois eles respeitam as próprias limitações físicas e devem ser utilizados de acordo com a aplicação necessária (WHITEHOUSE, 2002; WECKENMANN; NALKNTIC, 2003; DENKENA; BIERMANN, 2014; HU *et al.*, 2020; BIERMANN *et al.*, 2012).

Não existem métodos padronizados que definam a geometria do gume independentemente das condições de corte. Consequentemente, não é possível fazer uma comparação confiável entre as geometrias do gume com base em diferentes métodos de caracterização. Devido à sua simplicidade, muitas pesquisas ainda usam o raio do gume  $r_\beta$ . Conforme visto, o método do fator de forma K não caracteriza devidamente o perfil do gume da ferramenta. Mas é uma alternativa adequada para atender à maioria dos requisitos relacionados à caracterização de diferentes perfis e contornos do gume. É recomendado para a caracterização de perfis do gume com geometrias uniformes, pois ele fornece informações inequívocas sobre a forma do gume com apenas três parâmetros principais (DENKENA; BIERMANN, 2014).

### 3.3.3 Processos para o tratamento de gume

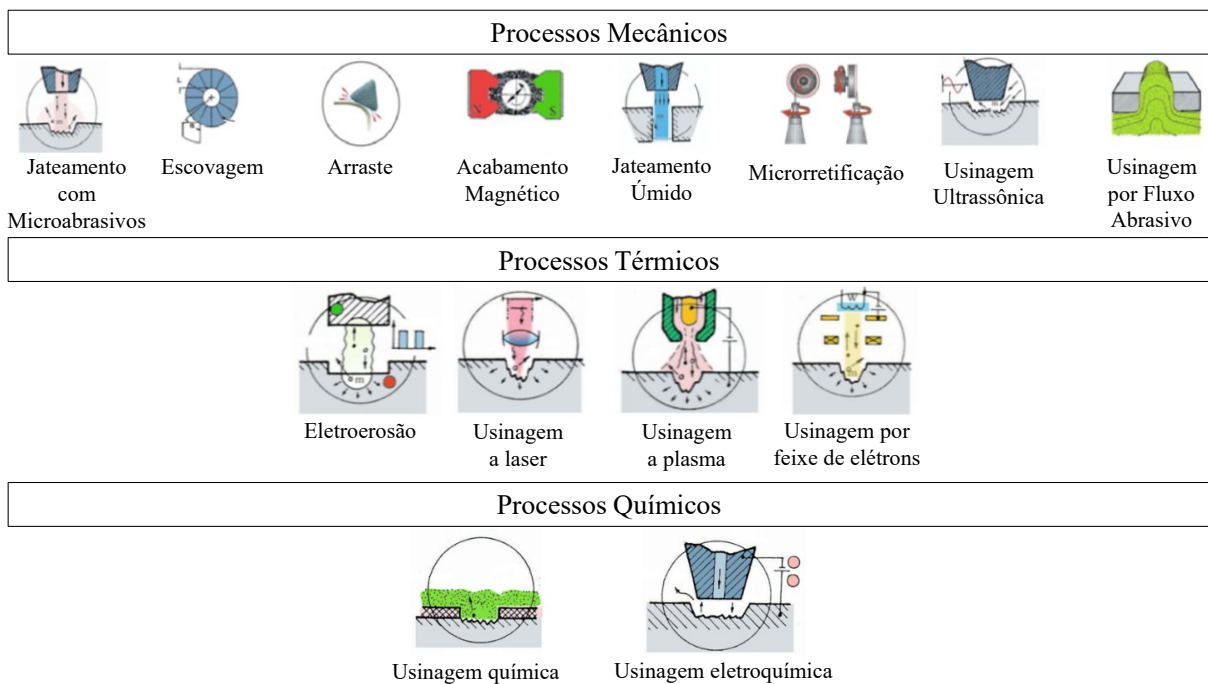
Ao longo dos anos, dentre os processos de usinagem existentes, alguns foram aprimorados e outros desenvolvidos especialmente para o tratamento do gume das ferramentas de corte. Ao selecionar um processo para uma devida aplicação, uma série de fatores devem ser levados em conta como: tipo de ferramenta a ser tratada e sua macrogeometria; possibilidade de produzir a microgeometria e mesogeometria necessária; material da peça a ser usinada; conformidade com as tolerâncias requeridas e a produtividade relacionada ao custo-benefício (KLOCKE, 2018; RODRÍGUEZ, 2009).

Os processos de preparação de gume se diferem essencialmente pelo seu princípio operacional e pela sua fonte energética para a remoção de material, categorizados pela sua natureza mecânica, térmica e química, vistos pela Figura 14 (RODRÍGUEZ, 2009, DENKENA; BIERMANN, 2014; ZHUANG *et al.*, 2021).

Os processos mecânicos se utilizam do contato mecânico entre duas superfícies para promover a remoção de material do gume. Dentre as vantagens deste princípio são pela sua reprodutibilidade, facilidade de implementação e seu custo benefício frente aos processos de natureza química e térmica. Por este motivo, os processos mecânicos são os mais utilizados

para o tratamento de gume, como o jateamento com microabrasivos, jateamento úmido, arraste, escovamento e o acabamento magnético (DENKENA; BIERMANN, 2014; KLOCKE, 2018; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; ZHUANG *et al.*, 2021; RODRÍGUEZ, 2009; TIKAL, 2009).

Utilizados com menor intensidade, temos a microrretificação, fluxo abrasivo, usinagem ultrassônica, usinagem eletroquímica, usinagem por eletroerosão, laser e a eletroquímica. As demais técnicas são pouco utilizadas, e somente em aplicações específicas, fato dado pela complexidade do processo e equipamento (RODRÍGUEZ, 2009; KLOCKE, 2018; DENKENA; BIERMANN, 2014).



**Figura 14.** Processos de tratamento de gume (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009).

Um passo importante para o tratamento de gume é a escolha assertiva do processo, que leva primariamente em conta o tipo de ferramenta de corte a ser tratada e sua macrogeometria. Ferramentas inteiriças como brocas helicoidais, requerem processos que possuam: uma boa reprodutibilidade na geração da mesogeometria e microgeometria; alta produtividade e capacidade de tratar várias ferramentas simultâneas; um bom custo-benefício e que gerem o gume com uma qualidade superficial adequada. Dentre os processos conhecidos, os mais indicados para a utilização com brocas helicoidais se dão pelos processos mecânicos, mais especificamente, o jateamento com microabrasivos, a escovamento e o arraste (KLOCKE, 2018; RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014; TIKAL, 2009).

### 3.3.3.1 Escovamento

O escovamento é um processo de usinagem com a geometria do gume de corte indefinida. É vastamente utilizado para o tratamento de superfícies, remoção de rebarbas e remoção de material, além de ser empregado na preparação de gume de ferramentas de corte (BASSET *et al.*, 2012; DENKENA; BIERMANN, 2014, KLOCKE, 2018).

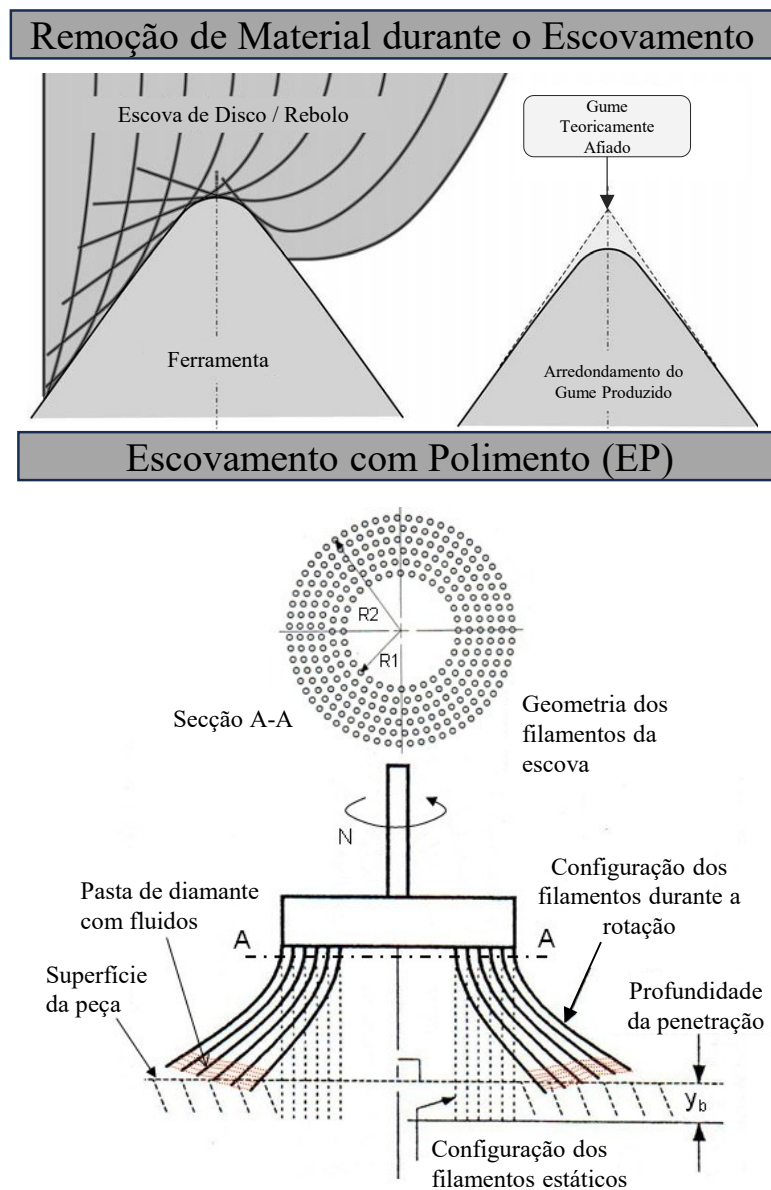
Para que seja possível efetuar o arredondamento do gume por meio do processo de escovagem, geralmente podem ser utilizadas ferramentas periféricas rotativas na forma de rebolos ou escovas de disco. Elas são compostas de cerdas ou filamentos de diferentes materiais como materiais poliméricos como o *nylon*, origem natural como a crina de cavalo e de materiais metálicos como o aço que, conseqüentemente, alteram o poder de abrasividade. A mecânica de remoção de material também depende do material empregado nos filamentos da escova. A flexibilidade geométrica da modelagem do gume da escova é limitada, e mecânica do processo de remoção de material é complexa, atribuído à interação que ocorre entre a face do filamento e a peça que será escovada (RODRÍGUEZ, 2009; TIKAL, 2009; BASSET *et al.*, 2012; DENKENA *et al.*, 2010, DENKENA *et al.*, 2009b; DENKENA; BIERMANN, 2014).

No caso dos filamentos de *nylon* e de aço, se dá pelo contato direto entre os filamentos da escova com a superfície do gume da ferramenta. Em conjunto, é incorporado nos filamentos um material abrasivo, geralmente o SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CBN ou PCD, que representa cerca de 30 a 40% do volume total, e são muito eficientes para a remoção de material do gume. O mecanismo de remoção de material se dá pela abrasão, e as partículas de material abrasivo que ficam expostas nas extremidades do filamento da escova causam a formação de cavacos na superfície da ferramenta escovada. Além disso, a maior parte da remoção de material é devido à ruptura da superfície causada por microfissuras iniciadas pelo contato das cerdas (OVERHOLSER *et al.*, 2003; RODRÍGUEZ, 2009; TIKAL, 2009; DENKENA *et al.*, 2010).

Quando se faz o uso de filamentos suaves de baixa abrasividade, como as cerdas naturais, emprega-se uma pasta abrasiva que efetua a remoção de material. Este processo é chamado de escovamento com polimento (EP). As cerdas naturais servem como uma almofada de polimento para a pasta abrasiva adicionada, que geralmente contém micropartículas de diamante que variam na faixa de 2 a 8 µm. Alguns autores descrevem este sistema com quatro componentes, nos quais os mecanismos de remoção de material são compreendidos através da interação entre a ferramenta de corte, fluido abrasivo, granulação e a almofada de polimento. Esta última, promove um movimento relativo entre as partículas de diamante e a peça, além de afetar o transporte da pasta abrasiva através do contato (RODRÍGUEZ, 2009; TIKAL, 2009;

DENKENA; BIERMANN, 2014; BERGS *et al.*, 2020).

O esquema de remoção de material da escova e descrição do princípio do escovamento com polimento (EP) pode ser visto na Figura 15. A taxa de remoção de material por este método depende do número de grãos abrasivos em ação e da capacidade dos grãos abrasivos de remover o material. À medida que o material é removido da peça de trabalho, alguns detritos de polimento e partículas abrasivas saem da região de interface de contato entre a almofada de polimento e a peça, e alguns permanecem presos às almofadas. Portanto, a taxa de remoção de material diminui com a quantidade de material removido (RODRÍGUEZ, 2009).



**Figura 15.** Processo de escovamento (Adaptado de TIKAL, 2009; RODRÍGUEZ, 2009).

O processo de escovamento abrange um grande número de variáveis de controle. As referentes ao projeto da escova são a configuração do fio, comprimento do fio livre, número de

fios, diâmetro, densidade e formato do fio. Em conjunto, são necessários parâmetros do processo como velocidade de rotação, profundidade de penetração, ângulo de penetração e duração da escovação para uma completa caracterização do processo de escovamento, que afetam diretamente o tamanho do arredondamento do gume e o seu formato (TIKAL, 2009).

O aumento velocidade de rotação da escova gera um incremento na energia cinética no local, bem como na taxa de remoção de material. Da mesma forma, com uma maior profundidade de penetração, há um achatamento maior do perfil do gume pela extração de material, por conta do incremento da pressão na interface dos filamentos com o gume. Uma maior granulação utilizada no abrasivo da pasta de diamante, bem como uma maior densidade do filamento polimérico com abrasivo, influenciam nesta remoção de material. Com curtos tempos de escovamento, se obtêm raios menores e menores temperaturas do filamento. Por outro lado, com tempos de processo mais longos se obtêm o raio do gume significativamente maior, mas pode gerar elevadas temperaturas e danos permanentes ao filamento. Pela natureza do processo, tensões compressivas residuais são induzidas na superfície que foi escovada (TIKAL, 2009; RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA *et al.*, 2007; DENKENA *et al.*, 2009b; DENKENA *et al.*, 2010; BASSET *et al.*, 2012; DENKENA; BIERMANN, 2014; OVERHOLSER *et al.*, 2003; BERGS *et al.*, 2020).

Isto posto, uma grande variedade de microgeometrias podem ser geradas, com amplitude de raio de 5  $\mu\text{m}$  até 150  $\mu\text{m}$ , aplicado a vasta maioria das ferramentas. Além disto, arredondamentos simétricos ( $K = 1$ ) e assimétricos ( $K < 1$  e  $K > 1$ ) também são obtidos com a correta seleção dos parâmetros do processo de escovamento (TIKAL, 2009; RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014; DENKENA *et al.*, 2010; BASSET *et al.*, 2012).

Dentre as desvantagens se tem a determinação inadequada do desgaste da escova, que dificulta o controle do processo, consequentemente o valor do raio a ser produzido. Em geral, as escovas são substituídas apenas com base na experiência, o que pode levar a uma reprodutibilidade insuficiente. Além disso, apenas as partes externas da ferramenta podem ser totalmente tratadas por este processo, portanto, ferramentas com geometrias complexas não são recomendadas para este processo (BASSET *et al.*, 2012; RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA *et al.*, 2010; TIKAL, 2009).

Por todos os motivos citados, o escovamento é um método consolidado e amplamente utilizado na indústria por conta da robustez e simplicidade do processo, custos relativamente baixos do processo, fácil manutenção da escova e dos baixos tempos de processamento (TIKAL, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014).

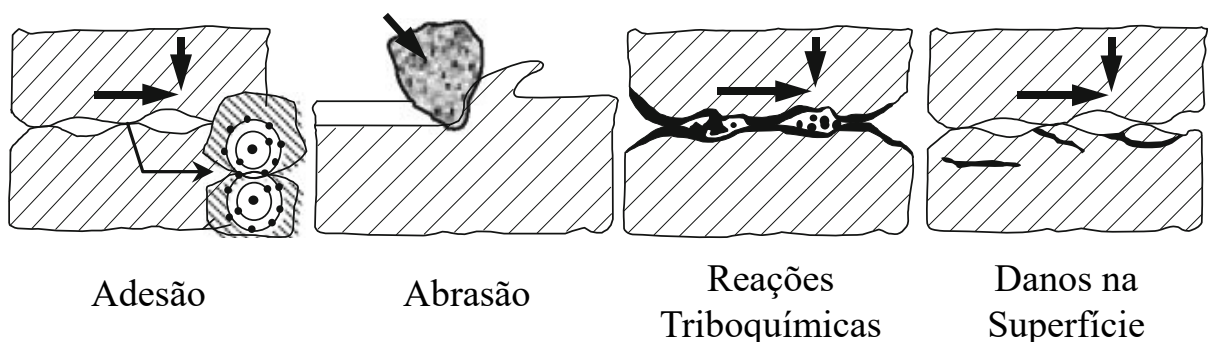
### 3.4 DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

Durante o processo de corte, ocorrem fenômenos de deformação, separação e fricção na área do gume. Os materiais empregados em ferramentas de corte estão sujeitos a complexos carregamentos trativos e compressivos, altas velocidades de corte e altas temperaturas. Entende-se por desgaste da ferramenta de corte a alteração do seu formato original durante o corte, resultado da deformação ou perda gradual de material da ferramenta (ISO 3685, 1993; KLOCKE, 2018).

#### 3.4.1 Mecanismos de Desgaste

O estresse tribológico está associado com o processo de conversão de energia na camada da superfície, que pode levar a remoção de material. Por sua vez, as ferramentas de corte se desgastam durante o processo de usinagem. As formas usuais de desgaste se situam no gume de corte, que são dependentes do material da peça e ferramenta, além das condições do corte (ZUM GAHR, 1987; KLOCKE, 2018; SOMMER; HEINZ; SCHÖFER, 2018).

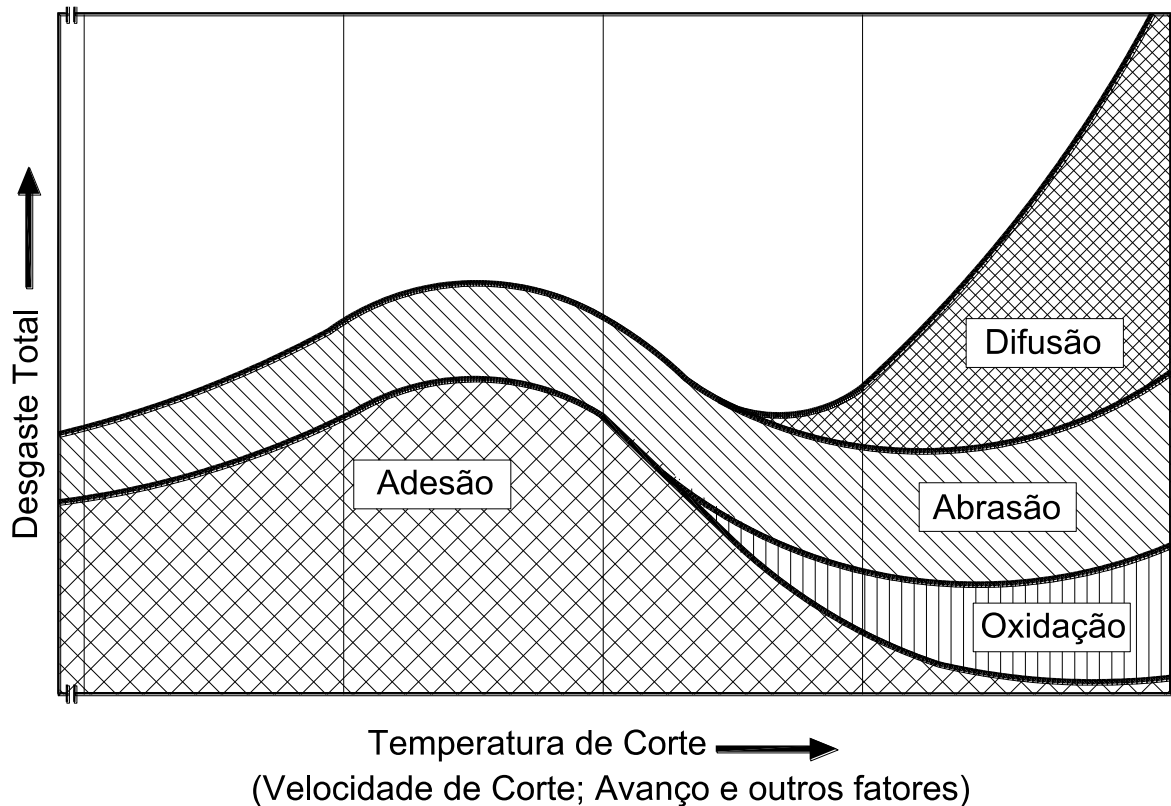
O conhecimento dos mecanismos de desgaste presentes em um processo são importantes para a seleção dos materiais e avaliação dos fenômenos de desgaste. Os mecanismos de desgaste, classificados de acordo com a norma DIN 50320 (1979), podem ser vistos na Figura 16 (ZUM GAHR, 1987; SOMMER; HEINZ; SCHÖFER, 2018).



**Figura 16.** Mecanismos de desgaste (Adaptado de KLOCKE, 2018; ZUM GAHR, 1992).

Devido às elevadas solicitações mecânicas e térmicas, o desgaste da ferramenta de corte é relativamente rápido. No âmbito da usinagem, alguns autores classificam os mecanismos de desgaste influentes para as ferramentas de corte de uma forma distinta da que é representada pela norma DIN 50320, representados esquematicamente na Figura 17. Eles podem ocorrer simultaneamente, a depender das condições de usinagem, e muitas vezes sua causa e efeito

difficilmente são distinguíveis (KÖNIG; KLOCKE, 1997, ZUM GAHR, 1992).



**Figura 17.** Principais mecanismos de desgaste presentes em ferramenta de corte (Adaptado de KÖNIG; KLOCKE, 1997).

Conforme demonstrado no gráfico, os quatro mecanismos de desgaste e a magnitude de desgaste experimentada pela ferramenta durante o processo de usinagem são dependentes da temperatura de corte ou de quaisquer fatores que a influenciem.

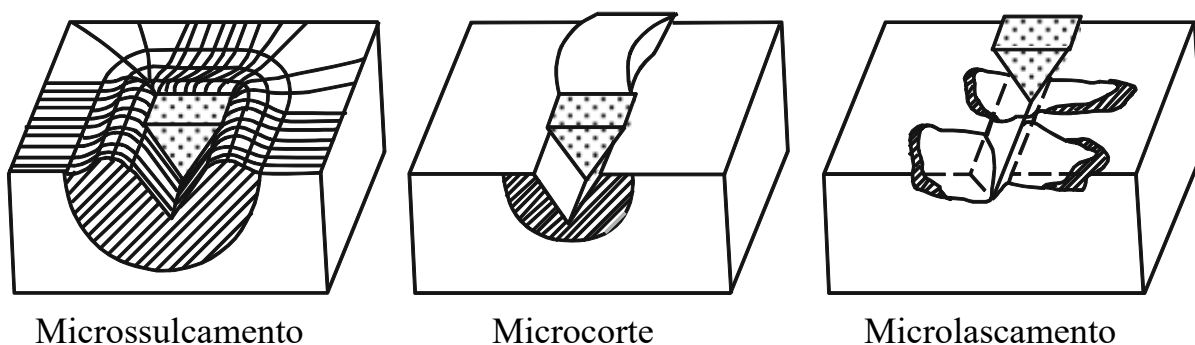
#### 3.4.1.1 Abrasão

Este mecanismo ocorre quando as asperezas do contracampo ou partículas duras, que atuam como material intermediário, penetram a superfície do material da ferramenta e da peça, e, simultaneamente, fazem um movimento tangencial, gerando marcas e microcortes. Existem algumas formas de abrasão como as ranhuras, erosão, entalhe, sulcamento e jateamento (KÖNIG; KLOCKE, 1997, STEMMER, 2005a; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013).

A abrasão, ou também designada por desgaste mecânico, sempre irá ocorrer nos processos de usinagem com geometria definida “corte”, como é o caso da furação. Esta ocorrência deve-se ao contato mecânico entre o gume da ferramenta e a superfície da peça, que é constante, independente das condições de corte do processo (KLOCKE, 2018; SOMMER; HEINZ; SCHÖFER, 2018; DIN 8580, 2003).

O desgaste de ranhuras é causado por partículas que possuem alta dureza ou elevada rugosidade. É a forma dominante do desgaste abrasivo. O estresse tribológico causado no material da ferramenta é baseado no efeito abrasivo das partículas duras que penetram na superfície que, sob stress, gera marcas ou ranhuras a partir de um movimento deslizante na superfície de contato da peça ou do cavaco. Este particulado tem origem no material da peça a ser usinado (óxidos, carbonetos, nitretos), ou é transferido por adesão do substrato da ferramenta de corte para a peça ou para a parte inferior do cavaco (KLOCKE, 2018; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; STEMMER, 2005a; TRENT, WRIGHT, 2000).

O desgaste abrasivo pode envolver deformações plásticas e fratura frágeis. Podem ser subdivididos em microsulcamento, microcorte e microlascamento, vistos na Figura 18.



**Figura 18.** Tipos de danos causados por partículas abrasivas (Adaptado de ZUM GAHR, 1987).

No caso do microsulcamento, o material é deformado plasticamente, que gera uma transposição de material para as laterais do sulco. Em um caso ideal, nenhum material é perdido. A abrasão presente no gume de corte ou na zona de contato com a face e flanco da ferramenta provoca o desprendimento de partículas do substrato da ferramenta, as quais fluem para a face ou flanco da ferramenta sob uma elevada pressão. Isto acarreta em perdas de materiais nos que são de natureza dúcteis e frágeis, que correspondem aos microcortes e microlascamentos, respectivamente. Este processo é chamado por alguns autores como “desgaste autoinduzido”, e é de suma importância, principalmente em relação a formação e desenvolvimento do desgaste de flanco da ferramenta de corte (ZUM GAHR, 1992; KLOCKE, 2018; TRENT, WRIGHT, 2000; MACHADO *et al.*, 2009; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013).

Por ser um processo puramente mecânico, resulta em altas temperaturas no flanco e na face da ferramenta. As forças envolvidas no processo removem partes do substrato com menor dureza, consequência das temperaturas elevadas, que prejudica o acabamento superficial do gume. Além disto, este mecanismo de desgaste aumenta com o número de inclusões e partículas de elevada dureza, como óxidos e carbonetos (TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; KÖNIG;

KLOCKE, 1997, STEMMER, 2005a).

#### 3.4.1.2 Adesão

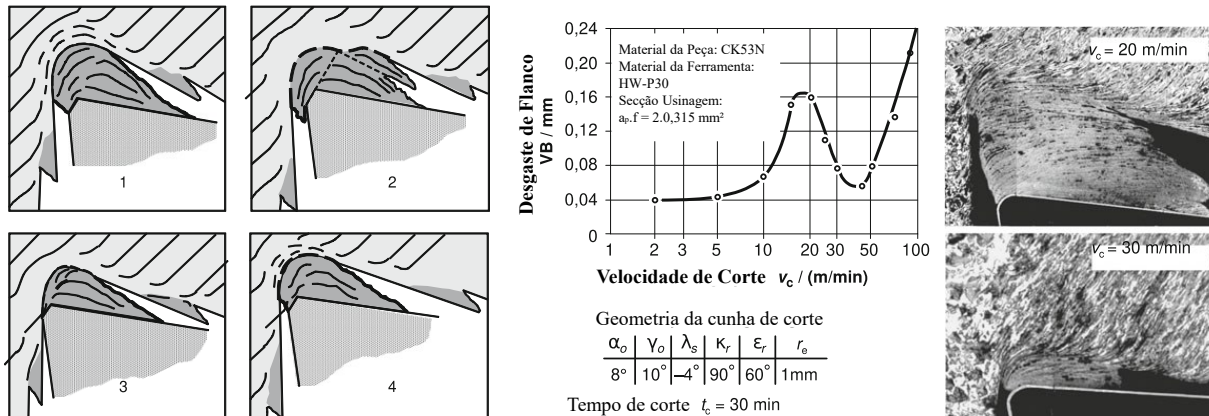
A adesão pode ser definida como a formação de ligações entre certas moléculas. Como mecanismo de desgaste, esse processo pode ser entendido como ligações atômicas formadas na interface de contato entre o material da peça (contracorpo) e o material da ferramenta (substrato), na forma de microcaldeamentos. As forças elevadas durante o processo e a interação do cavaco com a face da ferramenta resultam na formação destes caldeamentos. Estas ligações são então deformadas, reforçadas e rompidas, pelo movimento tangencial de fricção das partículas (ZUM GAHR, 1987; KÖNIG; KLOCKE, 1997; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; SOMMER; HEINZ; SCHÖFER, 2018).

Consequentemente, este mecanismo de desgaste ocorre devido ao rompimento dos microcaldeamentos formados na face da ferramenta. Na formação de cavaco, as camadas de material, após a usinagem, geram uma camada limite entre a superfície inferior do cavaco e a face da ferramenta, que são deformadas plasticamente. A separação de material pode ocorrer na camada limite, em um ou em ambos os corpos. Com o incremento do stress, da velocidade, ou da temperatura das partículas em um contato mútuo, este mecanismo de desgaste pode resultar em ranhuras, devido ao aumento do coeficiente de fricção (KLOCKE, 2018; SOMMER; HEINZ; SCHÖFER, 2018; ZUM GAHR, 1987; STEMMER, 2005a).

A propensão à formação da adesão depende das propriedades físicas e químicas dos materiais envolvidos no processo. A magnitude da força da adesão depende da área de contato entre as superfícies do material. Portanto, a resistência desta adesão é diretamente proporcional à deformação experienciada. Somente é possível afirmar se um material terá propensão à adesão quando comparado com o outro material presente no processo (KLOCKE, 2018; ZUM GAHR, 1987).

A intensidade do desgaste pela adesão é influenciada por distúrbios no fluxo de material sobre a face da ferramenta. Por isto, o conjunto material-ferramenta, por apresentar elevadas deformações e temperaturas, são altamente ativos, propícios para o surgimentos de novos caldeamentos. Em velocidades de corte mais baixas, este desgaste aumenta, em decorrência da formação do gume postiço. Por sua vez, o gume postiço é caracterizado por camadas altamente encruadas do material usinado, que assumem a função de gume de corte após serem caldeadas na face da ferramenta. Ao depender das condições de corte, o gume postiço desliza periodicamente entre a face e o flanco da ferramenta, num processo cíclico que

se inicia na fase um até a fase a quatro, conforme ilustrado na Figura 19 (ZUM GAHR, 1987; STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013).



**Figura 19.** Esquema de formação periódica do gume postiço (esq.), e do desgaste de flanco em relação a formação do gume postiço (dir.) (Adaptado de KLOCKE, 2018).

Na curva da Figura 19, pode-se visualizar que o desgaste do flanco da ferramenta não aumenta de forma proporcional ao aumento da velocidade de corte, mas sim com valores extremos característicos. O maior desgaste ocorre na maior formação de gume postiço, enquanto a diminuição de desgaste acontece onde há redução da ocorrência do gume postiço (KLOCKE, 2018; STEMMER, 2005a).

Isso posto, o desgaste por adesão pode ser mitigado de algumas formas. A principal, é com o incremento da velocidade de corte, que resulta em um aumento da temperatura na interface na ferramenta. Além disto, o tempo de contato entre o material da peça e o substrato da ferramenta é menor, que reduz a intensidade da formação do caldeamento. Por fim, a adição de um revestimento na ferramenta também é efetiva, pois o potencial do material se caldear nele é consideravelmente menor que o substrato da ferramenta, além da proteção ao contato direto do substrato com o material usinado (STEMMER, 2005a; KÖNIG; KLOCKE, 1997).

### 3.4.1.3 Reações Triboquímicas

Este mecanismo de desgaste pode ser caracterizado pelo contato friccional entre duas superfícies sólidas que reagem com o ambiente. Este ambiente corrosivo pode estar no estado líquido ou gasoso. O desgaste ocorre pela remoção de metal e também pela remoção contínua, que gera um nova formação de produtos de reações químicas entre as superfícies de contato. A ativação térmica e mecânica (aumento da energia interfacial) resulta no crescimento da reatividade e na taxa de reação química nas áreas de contato. De acordo com alguns autores,

este mecanismo pode se subdividir em várias categorias, porém as duas que estão presentes em ferramentas de corte são a oxidação e a difusão (KLOCKE, 2018; ZUM GAHR, 1987; SOMMER; HEINZ; SCHÖFER, 2018).

#### *3.4.1.3.1 Oxidação*

Corresponde a reação química causada entre o material da peça, o material da ferramenta e o meio, fruto da ativação causada pela fricção. Ele acontece em temperaturas mais elevadas e, causa alterações nas propriedades da superfície externa do material da ferramenta quanto no cavaco. É visualizada por uma coloração de revenimento, que indica a presença deste desgaste oxidativo (TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; STEMMER, 2005a).

Nas ferramentas cujo o substrato é o metal-duro, a oxidação ocorre na faixa de 700°C. O oxigênio presente na atmosfera ambiente facilita a formação de uma camada de óxido ou produto de desgaste oxidativo, decorrente das elevadas temperaturas experienciadas no gume da ferramenta. A deformação plástica da superfície acelera a oxidação, o que leva a camadas de óxido muito mais espessas em comparação com a oxidação de superfícies não deformadas (SOMMER; HEINZ; SCHÖFER, 2018; STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018).

Em baixas temperaturas a camada protetora de material oxidado faz com que este tipo de desgaste seja evitado. Uma forma de mitigar essa forma de desgaste é com a adição de um revestimento na ferramenta, pois diminui a interação química na interface da ferramenta com o material da peça, e conseqüentemente a fricção (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018).

#### *3.4.1.3.2 Difusão*

Assim como o desgaste por oxidação, o desgaste por difusão também ocorre em elevadas temperaturas. As altas pressões e temperaturas presentes na zona de contato ferramenta-peça propicia um cenário favorável para a difusão dos átomos. Isto induz a movimentação dos átomos, e eles acabam trocando de interface. Este processo faz com que a resistência ao desgaste da ferramenta seja reduzida por partículas indesejadas, que se difundem a ela ou do particulado do substrato da ferramenta se difundindo dele (KLOCKE, 2018; SOMMER; HEINZ; SCHÖFER, 2018; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; STEMMER, 2005a).

Nas áreas tribologicamente afetadas, ocorre uma perda direta de material, que no caso da ferramenta, está localizada no gume, e geralmente é pequena. Em ferramentas de corte que possuem maior percentual elementos de liga, a interação atômica é mais forte, que aumenta a

perda de material (KLOCKE, 2018; STEMMER, 2005a; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; TRENT; WRIGHT, 2000).

A difusão surge especialmente em altas velocidades de corte, que elevam consideravelmente as temperaturas na zona de contato, onde o material da peça e o substrato da ferramenta se aproximam em um nível atômico. Em ferramentas de metal-duro, a interação ocorre por conta da solubilidade mútua dos materiais presentes no substrato como o tungstênio e o cobalto. As reações de difusão mais comuns são: (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018; TRENT, WRIGHT, 2000).

- Difusão do ferro na fase do cobalto, formando uma liga de fácil desgaste, com baixo ponto de fusão;
- Difusão do cobalto no aço, que ao se dissolverem formam cristais mistos;
- Difusão no carbono, retirado dos carbonetos e transferido pra o aço;
- Dissolução do Carbeto de Tungstênio (WC), formando cristais mistos e duplos;

A influência da composição do metal-duro está diretamente ligada a profundidade da difusão e a velocidade de difusão. O cobalto, sob altas temperaturas, é expulsado do substrato sob pressão pelo alto coeficiente de expansão térmica. Para se mitigar o desgaste por difusão, deve-se reduzir as velocidades de corte empregadas e empregar o uso de revestimento a base de titânio e tântalo (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018).

#### 3.4.1.4 Danos na superfície

Ocorrem a partir de um estresse tribológico alternado. Nas áreas superficiais sob estresse, o carregamento mecânico e térmico de forma alternada e cíclica leva a alterações na estrutura, fadiga, rompimento e até a separação do material desgastado. Ao contrário da abrasão, na qual o desgaste ocorre a partir de um único processo de estresse, este mecanismo usualmente advém de longos períodos de incubação, nos quais preliminarmente não são vistos danos na superfície (KLOCKE, 2018; ZUM GAHR, 1987).

Apesar de não ser considerado como uma das principais causas de desgaste pela literatura, vista na Figura 18, são os danos causados no gume da ferramenta em decorrência da sobrecarga mecânica e térmica. São dependentes de diversos fatores como as propriedades mecânicas dos materiais e das condições de corte. Os desgastes comuns para esta causa são os lascamentos, fissuras e deformações plásticas (ZUM GAHR, 1987; KLOCKE, 2018; STEMMER, 2005a).

#### 3.4.1.4.1 *Lascamentos*

Os lascamentos no gume ou na quina são causados por excessivas forças de corte, decorrentes de baixos ângulos de cunha e de quina, ou do material empregado na ferramenta ser frágil. O perfil da superfície da fratura é determinado pelo sentido da força de corte. Em cortes interrompidos, há uma tendência da ocorrência de lascamentos, principalmente em materiais da peça muito tenazes e materiais da ferramenta muito frágeis. Inclusões não metálicas no material da peça, originárias do processo de desoxidação do aço, favorecem os microlascamentos em ferramentas de metal-duro ou cerâmicas. O aço-rápido, por ser mais tenaz, é pouco sensível a esta solicitação (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018; TRENT; WRIGHT, 2000)

Cavacos de grandes dimensões e vibrações no conjunto máquina ferramenta interferem negativamente na estabilidade do corte e, conseqüentemente, propiciam a geração de lascamentos. A quebra do gume principal tanto como o secundário pode ser atribuída ao choque do cavaco diretamente nestas seções ou durante o trancamento do cavaco (STEMMER, 2005a; MACHADO *et al.*, 2009).

#### 3.4.1.4.2 *Fissuras*

No caso de processos de usinagem em que o corte é interrompido, como o fresamento, o material da ferramenta de corte é submetido a um esforço compressivo alternante, que leva a fadiga do gume de corte. No caso de ferramentas de metal-duro, essas fissuras são transversais. No outro caso, as fissuras longitudinais se caracterizam pelas solicitações térmicas cíclicas, primariamente em processos nos quais o corte é interrompido. Durante o corte, o gume sofre um aquecimento, e ao sair da peça de trabalho, se resfria, que induz um delta entre a temperatura mais alta e mais baixa. Quanto maior o delta de temperatura, mais propicio para o surgimento deste tipo de fissura. Portanto a utilização de fluido de corte em um processo interrompido deve ser verificado de acordo com a necessidade, pois aumenta o delta de temperatura, principalmente no metal-duro e em cerâmicas (KLOCKE, 2018; STEMMER, 2005a; TRENT; WRIGHT, 2000; WEINERT, 1999; ZUM GAHR, 1987).

#### 3.4.1.4.3 *Deformações plásticas*

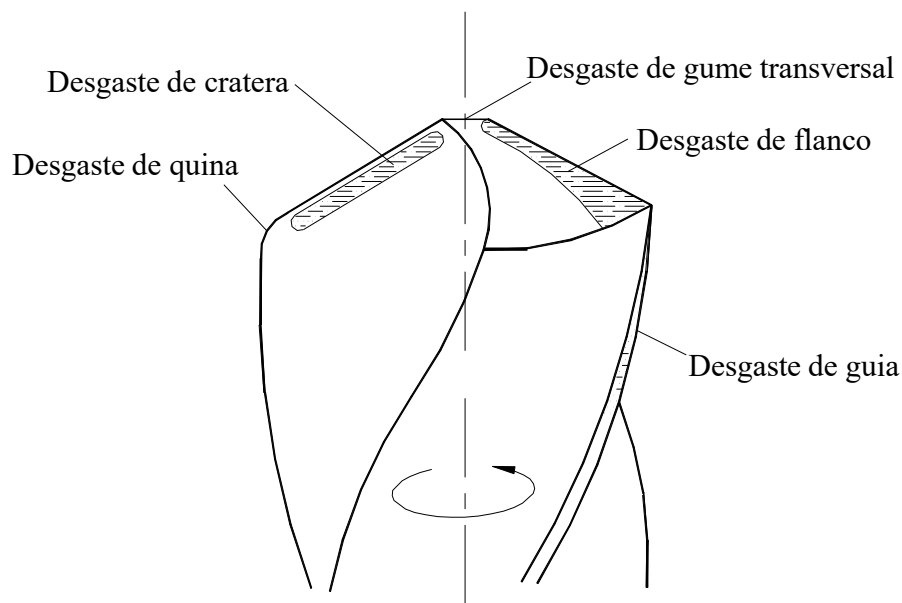
Elas ocorrem no gume quando o estresse termomecânico sofrido pela ferramenta

ultrapassa o limite de resistência ao escoamento do substrato da ferramenta. Os parâmetros mais influentes são a resistência mecânica do material a ser usinado, condições de corte, macrogeometria da ferramenta, além das propriedades mecânicas do substrato da ferramenta (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018; TRENT; WRIGHT, 2000).

As deformações plásticas no gume ocasionam um incremento considerável no desgaste, quem levam a um colapso repentino por meio de rachaduras e o arrancamento do gume. Em elevadas temperaturas de corte, ferramentas de metal-duro também experenciam esse tipo de desgaste. Já as altas tensões compressivas do gume fazem com que ele se desgaste, principalmente na usinagem de materiais de elevada dureza (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018; MACHADO *et al.*, 2009).

### 3.4.2 Tipos de desgaste em brocas helicoidais

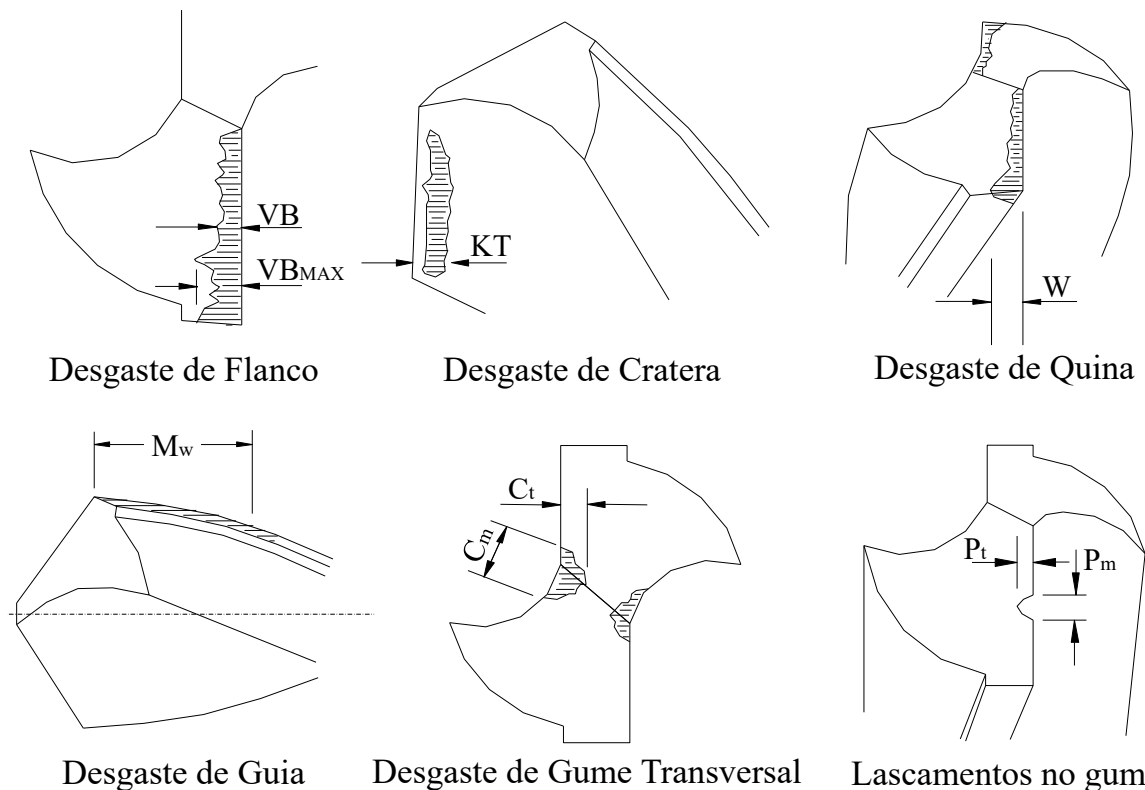
Mesmo com as melhorias significativas na qualidade de brocas helicoidais, constantemente implementadas, muitos problemas relacionados a performance da broca ainda existem. Um fator que afeta o desempenho da broca está interligado ao desgaste que ela experencia. Compreender e monitorar os tipos de desgastes que ocorrem são importantes para assegurar o melhor desempenho possível para o processo. Os esforços mecânicos presentes no processo de furação, aliados com os mecanismos de desgastes, resultam nos tipos de desgastes apresentadas na Figura 20 (KANAI, 1978; BRINKSMEIER, 1990; STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018).



**Figura 20.** Desgastes usuais de uma broca helicoidal (Adaptado de BRINKSMEIER, 1990).

Estes desgastes, na maioria das vezes, ocorrem de forma simultânea. A intensidade de cada desgaste depende de diversos fatores, como o material da peça e suas propriedades mecânicas, condições de usinagem (parâmetros de corte, uso de fluido lubrificante), tipo da furação e a macrogeometria da ferramenta (STEMMER, 2005a).

Na Figura 21 tem-se a representação dos desgastes típicos em brocas, suas nomenclaturas e seus locais de mensuração. O desgaste de flanco (VB) é a faixa desgastada no flanco da ferramenta, pois a superfície da peça recém usinada desliza pelo flanco, resultando em marcas. A largura dessas marcas em geral não é uniforme e exprime o tamanho de desgaste. Larguras irregulares normalmente são resultados de defeitos no gume da ferramenta, como o microlascamento (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013).



**Figura 21.** Tipos de desgastes de uma broca helicoidal com suas nomenclaturas (Adaptado de KANAI, 1978).

No caso das brocas, o desgaste de flanco tem seu valor máximo ( $VB_{MAX}$ ) na extremidade do gume. Isto se deve ao local da broca que possui a maior velocidade rotacional e ter o menor volume de material, se comparado as partes mais centrais do gume. Dependendo dos parâmetros de corte e na combinação dos materiais da peça e ferramenta, o desgaste de flanco tende a ser mais acentuado na periferia da zona de contato da ferramenta (STEMMER, 2005a; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; KÖNIG; KLOCKE, 1997).

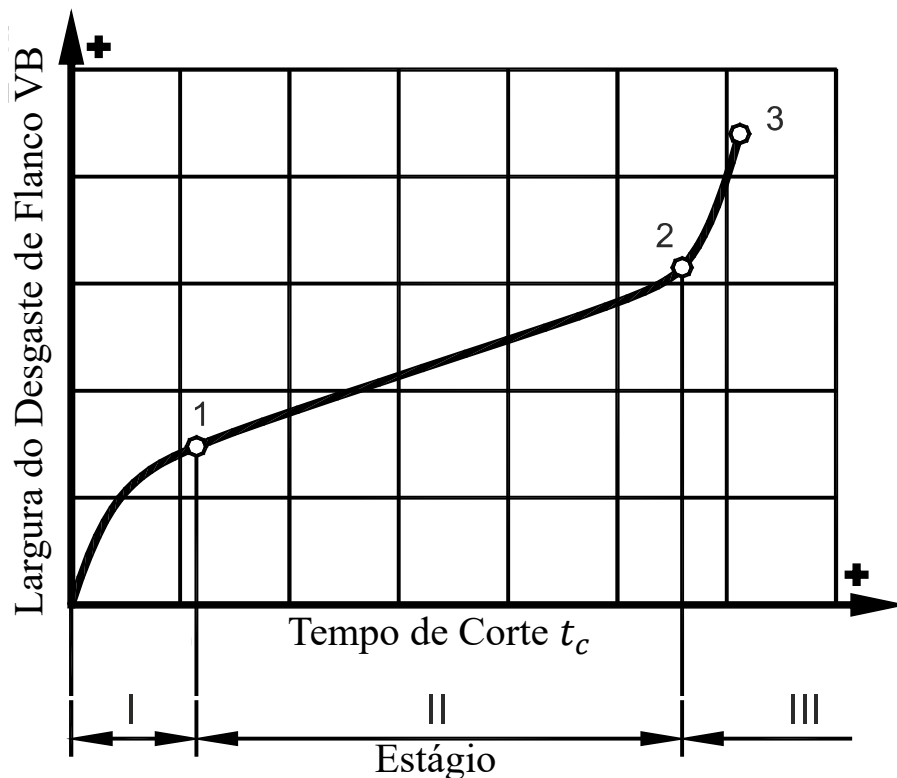
Desgaste de cratera (KT) é o desgaste que é causado a face da ferramenta (superfície de saída) em decorrência do atrito da mesma com o cavaco. O colapso da ferramenta pode se dar pela cratera, marca de desgaste ou também pelo efeito combinado dos dois. Além disto, em altas temperaturas, este tipo de desgaste é ampliado pelo mecanismo de difusão, que remove o material da ferramenta (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018, TÖNSHOFF; DENKENA, 2013).

O desgaste de quina (W) ocorre na região de intersecção entre os gumes principais e secundários, geralmente causado pelo atrito do material da peça no local. O desgaste de guia ( $M_w$ ) acontece ao longo da guia da broca, e é causado pelo atrito na parede do furo. Já o desgaste do gume transversal ( $C_m$  e  $C_t$ ) é causado por parâmetros de corte inadequados, elevando as forças no local. Os lascamentos no gume ( $P_m$  e  $P_t$ ) são quebras de pedaços do gume devido a sobrecarga mecânicas e térmicas, mau acabamento do gume ou ângulos de quina e cunha muito pequenos. Em brocas, os lascamentos também podem ocorrer na guia e na quina (STEMMER, 2005a).

### 3.4.3 Comportamento de desgaste de uma ferramenta de corte

Uma ferramenta de corte, mesmo se possuísse tenacidade suficiente para impedir danos, sempre estará sujeita a se desgastar. Porém, é de interesse comum saber como uma ferramenta de corte se comporta ao longo de sua vida. Por este motivo a norma DIN 6583 (1981), descreve o comportamento de desgaste da ferramenta como a capacidade do conjunto ferramenta-peça a resistir a um determinado processo de corte. Diversos fatores são decisivos para a forma que a ferramenta se desgasta, entre eles estão a durabilidade do gume da ferramenta, condições da usinagem (parâmetros de corte, fluido lubrificante, conjunto máquina-ferramenta) e usinabilidade do material da peça (KLOCKE, 2018, STEMMER, 2005a, MACHADO *et al.*, 2009).

As ferramentas de corte usualmente se desgastam de acordo com a Figura 22. A curva de evolução do desgaste é descrita por três estágios distintos. Ilustra uma relação entre o tamanho da largura de desgaste do flanco e o tempo de corte. Outras grandezas além do tempo de corte podem ser usadas como métricas em uma curva de comportamento de desgaste, entre elas estão: metros lineares usinados, volume de material removido, número de peças produzidas e no caso do processo de furação, o número de furos (KLOCKE, 2018; MACHADO *et al.*, 2009).



**Figura 22.** Comportamento de desgaste de uma ferramenta de corte em relação ao tempo de usinagem (Adaptado de DAVIM, 2008; MACHADO *et al.*, 2009).

O estágio I acontece na fase inicial do corte, o desgaste acontece de forma decrescente, a tangente a curva é disposta por ângulos de inclinação declinantes. A ferramenta experencia um desgaste acelerado, por conta da sua adaptação ao sistema tribológico que está compreendida. Com o passar do tempo de corte, o gume acaba se assentando ao processo, que mostra uma redução na taxa do desgaste. Isto ocorre até chegar a um ponto de estabilidade, caracterizado pelo ponto de inflexão da curva (1), finalizando o estágio (MACHADO *et al.*, 2009; DAVIM, 2008).

Por sua vez o estágio II apresenta uma taxa de desgaste que permanece constante ao passar do tempo. A adequação da ferramenta já ocorreu e portanto, os mecanismos de desgastes atuam a uma taxa constante até que a tangente da curva, que possuía um ângulo de inclinação constante, sofra uma inflexão e alteração do ângulo. Este estágio situa-se entre o ponto (1) e (2) (MACHADO *et al.*, 2009; DAVIM, 2008).

Em um certo ponto, a ferramenta exhibe uma aceleração na taxa do desgaste, caracterizado pela inflexão da curva (2) e aumento gradativo da angulação, chamado de estágio III. A ferramenta está fadada a quebra caso o corte continue a ocorrer dentro deste estágio, pois o desgaste é tão grande que a temperatura e os esforços mecânicos presentes no corte acarretam no colapso desta ferramenta, visto pelo ponto (3). Dentro dos processos de usinagem,

geralmente se evita utilizar a ferramenta que atingiu o estágio III de desgaste. A utilização de um critério de fim de vida evita que a ferramenta chegue neste estágio, que previne quebras e a piora da qualidade superficial da peça usinada (MACHADO *et al.*, 2009; DAVIM, 2008).

#### 3.4.4 Critério de fim de vida de uma ferramenta de corte

Ao passo que a ferramenta se desgasta gradativamente, verificam-se alterações no processo de usinagem, como: aumento da temperatura, forças de usinagem, potência consumida, alterações geométricas, e a piora na qualidade superficial. Utilizar a ferramenta que chega nesse estágio não é aconselhável, pois não há uma previsibilidade do comportamento da ferramenta e da sua vida (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; DINIZ *et al.*, 1999).

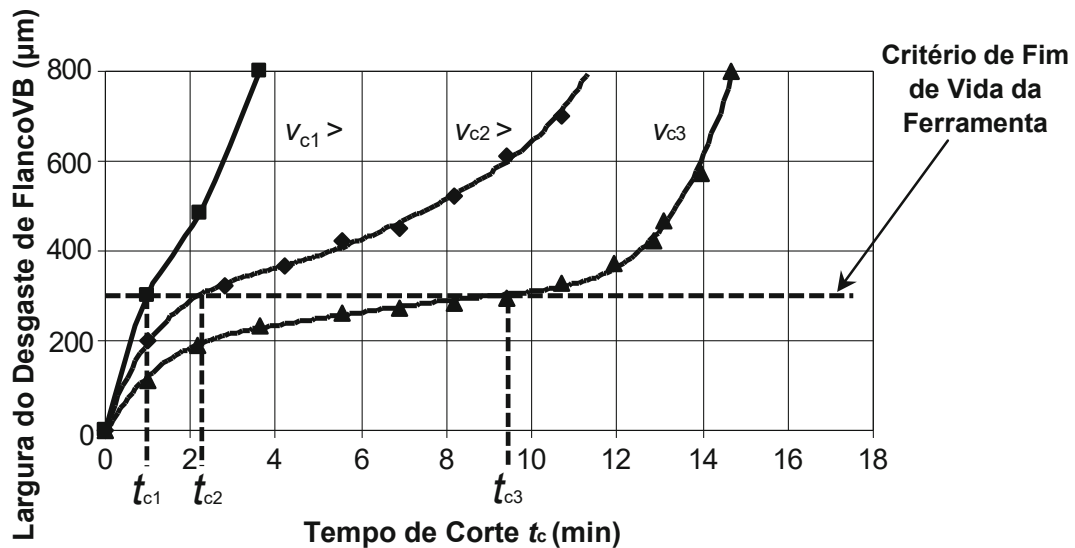
A vida da ferramenta depende de alguns fatores como os parâmetros do corte, compatibilidade entre o material da ferramenta e o material usinado, além da geometria da ferramenta e microgeometria do gume. Desta forma, é instaurado um critério de fim de vida da ferramenta, que determina o desgaste máximo que esta ferramenta pode experimentar sem que ela induza variações indesejadas no processo de usinagem (STEMMER, 2005a; KLOCKE, 2018; MACHADO *et al.*, 2009; ISO 3685, 1993).

Em ensaios laboratoriais e também na prática industrial são usados critérios de fim de vida qualitativos como: visualização de falhas na ferramenta; vibrações intensas no conjunto máquina-ferramenta; deficiência no acabamento superficial; presença de rebarbas a forma do cavaco. Os quantitativos por sua vez podem ser mensurados, tal qual o desgaste de flanco e cratera, torque ou potência, força de avanço, temperatura, dimensão da peça. Estes critérios tem o objetivo de prevenir a utilização da ferramenta com um desgaste acima do aceitável, prejudicando as usinagens subsequentes da ferramenta (KLOCKE, 2018; STEMMER, 2005a; TÖNSHOFF; DENKENA, 2013; ISO 3685, 1993; DINIZ *et al.*, 1999; CHILDS *et al.*, 2000).

A norma ISO 3685 (1993), indica valores quantitativos para o critério de fim de vida. Por ser mais fácil de mensurar, o desgaste de flanco (VB) é o mais utilizado em medições de desgastes para definir a vida da ferramenta. Para uma ferramenta de metal-duro, os valores sugeridos para o desgaste de flanco médio são  $VB = 0,3$  mm se a ferramenta obteve um desgaste regular ao longo do gume, enquanto o desgaste de flanco máximo  $VB_{MAX} = 0,6$  mm se a ferramenta não se desgastou regularmente ao longo do flanco. A aplicação deste critérios está amarrada diretamente ao tipo do processo de usinagem, condições do corte e dimensões da

ferramenta de corte, portanto, deve ser avaliada para o caso aplicado.

Por estes motivos, são executados testes de fim de vida para mensurar o comportamento de desgaste sempre que o mesmo for mais influente que a temperatura de corte para a vida útil da ferramenta. Na Figura 23, é possível visualizar as curvas teóricas de comportamento de desgaste para uma ferramenta de metal-duro na usinagem de um aço com tratamento térmico (KLOCKE, 2018, STEMMER, 2005a).



**Figura 23.** Curvas teóricas do comportamento de desgaste de uma ferramenta de metal-duro (Adaptado de KLOCKE, 2018).

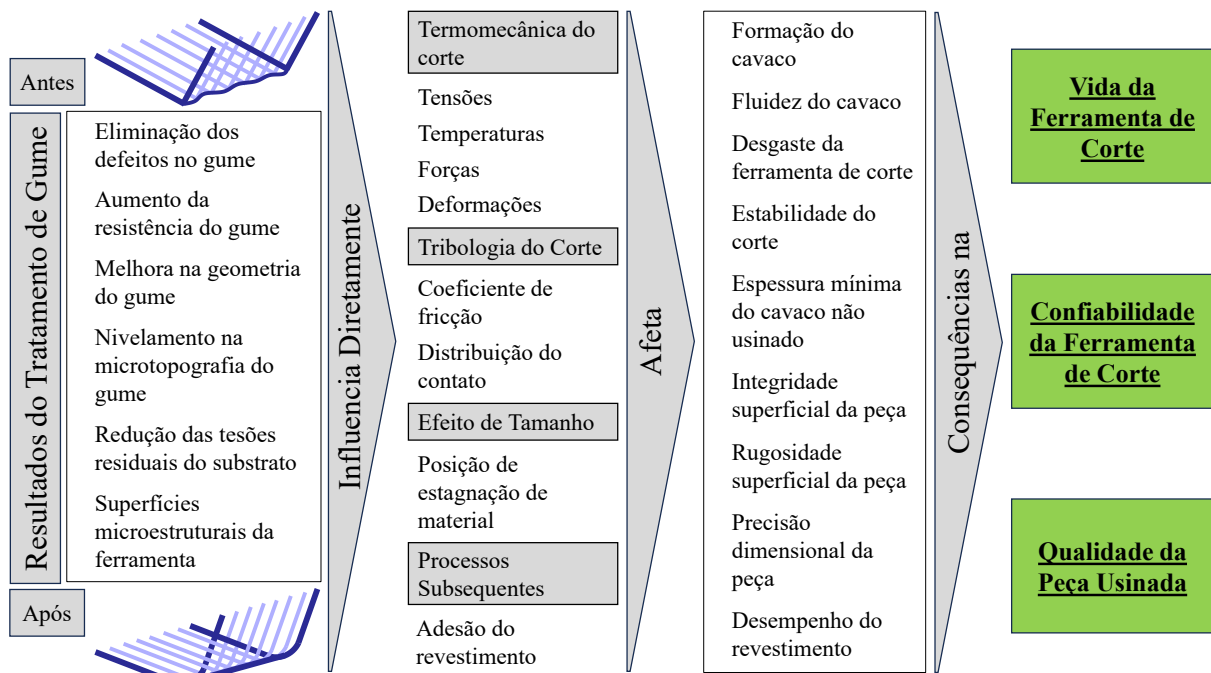
No gráfico, cada curva representa uma velocidade de corte utilizada e cada ponto representa uma medição de desgaste de flanco VB para um determinado tempo de corte. Foi instaurado um critério de final de vida para as ferramentas de corte, portanto, a ferramenta que ultrapassa este valor do desgaste não mantém as condições seguras para uma usinagem dentro das especificações (KLOCKE, 2018, STEMMER, 2005a).

A velocidade de corte é o parâmetro mais influente no comportamento de desgaste de uma ferramenta de corte. Dependendo da condição, velocidades de corte elevadas podem reduzir consideravelmente a vida útil da ferramenta, que atinge o critério de fim de vida  $VB_{MAX}$  instaurado primariamente do que a utilizar uma velocidade mais baixa (KLOCKE, 2018, STEMMER, 2005a).

A vida da ferramenta é um dos critérios mais significativos para caracterizar a usinabilidade do material. Traz informações relevantes sobre como a ferramenta se comporta em uma determinada condição, desde o corte inicial até a sua inutilização, definida através dos critérios citados anteriormente (MACHADO *et al.*, 2009).

### 3.5 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME NO DESGASTE DA FERRAMENTA

O tratamento de gume das ferramentas de corte é associado com a alteração da mesogeometria, microgeometria e microtopografia do gume, influente no processo de usinagem. Isto afeta o processo de formação do cavaco, os carregamentos térmicos e mecânicos, além da integridade superficial da peça usinada. O principal objetivo é maximizar a vida da ferramenta, qualidade da peça usinada e a confiabilidade do processo. O potencial de performance da ferramenta de corte depende de uma série de fatores, entre eles, o processo de fabricação, a preparação do processo, substrato, além da geometria do gume. Na Figura 24 se tem a cadeia de influência, efeitos e consequências do tratamento de gume no processo de usinagem (RODRÍGUEZ, 2009; TIKAL, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014).



**Figura 24.** Cadeia de efeitos da influência do tratamento de gume no processo de usinagem (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009).

Um dos tópicos que influenciam diretamente no processo de corte é o efeito de tamanho. A maioria dos modelos de corte são baseados na afirmação de que o gume de corte é perfeitamente afiado porém, este modelo só se aplica quando o tamanho do raio do gume é muito pequeno quando comparado com a espessura do cavaco não usinado “h”, no qual relação  $r_{\beta}/h$  tende a zero. Pelo fato de o gume possuir um arredondamento, a depender do seu tamanho é gerado um campo de fluxo de material. Em um determinado ponto específico ocorre uma estagnação de material no gume da ferramenta, no qual a velocidade do fluxo de material é nula (RODRÍGUEZ, 2009; KLOCKE, 2018).

A geração do cavaco também é alterada com o tamanho do arredondamento do gume, onde a energia de corte específica aumenta com a diminuição da espessura do cavaco não deformado. A espessura mínima do cavaco ( $h_{\min}$ ) é a espessura no qual abaixo dela não há separação de material, e portanto nenhuma geração de cavaco. Depende do raio do gume e da relação física entre a ferramenta e a peça usinada. O material fica preso na frente do gume, que faz com que ele seja esmagado e deslizado para fora da superfície do flanco da ferramenta, chamado de efeito de sulcamento (*ploughing*). Neste local há a presença de elevadas deformações plásticas e tensões compressivas residuais. A relação limite entre o raio do gume e espessura do cavaco ( $r_{\beta}/h$ ), determina o mecanismo de remoção de material, seja ele o corte, sulcamento ou deslizamento, que impacta diretamente na vida da ferramenta de corte e também na qualidade da superfície usinada (RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA, BIERMANN, 2014; BASSET *et al.*, 2012; BERGMAN *et al.*, 2019).

Os carregamentos termomecânicos experienciados no processo de usinagem também mudam, em decorrência do tratamento do gume aplicado a ferramenta de corte. A força de corte  $F_c$ , a força de avanço  $F_f$  e as temperaturas no gume de corte aumentam a partir do incremento do arredondamento do flanco  $S\alpha$  e do arredondamento médio  $\bar{S}$  e, conseqüentemente, o tamanho do raio  $r_{\beta}$ . Isto ocorre pelo aumento do atrito no gume de corte, principalmente no flanco da ferramenta que, por ter uma maior área de contato, resulta no aumento de estagnação de material pelo efeito de sulcamento (DENKENA, BIERMANN, 2014; DENKENA *et al.*, 2012a; BASSET *et al.*, 2012; VENTURA *et al.*, 2021).

A respeito da integridade superficial da peça usinada, é possível observar diferentes efeitos decorrentes da preparação do gume. A microtopografia do gume impacta diretamente na qualidade superficial da peça. Uma baixa rugosidade do gume resultará em um acabamento superficial da peça com menor rugosidade. Por outro lado, se a relação do tamanho do raio do gume com espessura do cavaco ( $r_{\beta}/h$ ) for grande, maior será o efeito de sulcamento no processo de usinagem. Como resultado, mais material tende a ser pressionado do gume para baixo do flanco da ferramenta, no qual gera marcas na superfície da peça que acabou de ser usinada. Geralmente com este efeito, a rugosidade superficial da peça aumenta, porém a predominância destes efeitos citados dependem de muitos fatores, como o material da peça, o processo de usinagem e até mesmo a utilização de fluido lubrificante (DENKENA, BIERMANN, 2014). Os trabalhos Bordin e Zeilmann (2014); Zeilmann *et al.*, (2011); Wang *et al.*, (2020a), Fontanive *et al.*, (2019), Bouzakis *et al.*, (2014) mostram que ferramentas com tratamento de gume resultaram em uma peça usinada com uma rugosidade menor, se comparada com a

ferramenta sem tratamento de gume.

De todos os fatores citados anteriormente, que são impactados pelo processo de tratamento de gume, implicam em consequências sobre o comportamento de desgaste e a vida da ferramenta de corte. O processo utilizado para efetuar o tratamento, bem como o tamanho do raio do gume, a mesogeometria e microgeometria do gume alteram diretamente estes fatores.

Na fabricação de uma ferramenta de corte, os rebolos abrasivos utilizados geram na ferramenta um gume afiado, notórios por deixar marcas na ferramenta no sentido da passagem do rebolo. Segundo Denkena *et al.* (2013) se as marcas de retificação não estiverem na mesma direção no qual o cavaco escoa, acarreta em uma maior abrasão do cavaco com a face da ferramenta, que aumentam os esforços mecânicos e térmicos no local. Além disto, há uma maior ocorrência do desgaste de cratera, com aumento da profundidade KT.

Em concordância, alguns autores afirmam que o processo de fabricação afeta negativamente o gume da ferramenta, que são susceptíveis a apresentar seguintes defeitos: lascamentos, rebarbas, efeito serrilhado, baixa qualidade superficial e microtopografia irregular. Além disto, o gume afiado é característico por possuir um raio pequeno. Isto está ligado diretamente ao fato de que a área de contato do gume com a peça usinada é reduzida, que resulta em baixa resistência mecânica frente as solicitações exigidas durante o corte (DENKENA; BIERMANN, 2014; TIKAL, 2009; DENKENA *et al.*, 2021).

Já com ferramentas que passam pelo tratamento de gume, o raio do gume aumenta em comparação com uma ferramenta que somente foi retificada. Na Figura 25 é possível verificar a influência de diferentes tamanhos de arredondamento de gume, produzidos pelo processo de escovamento por cerdas abrasivas poliméricas, na vida de uma ferramenta de corte.

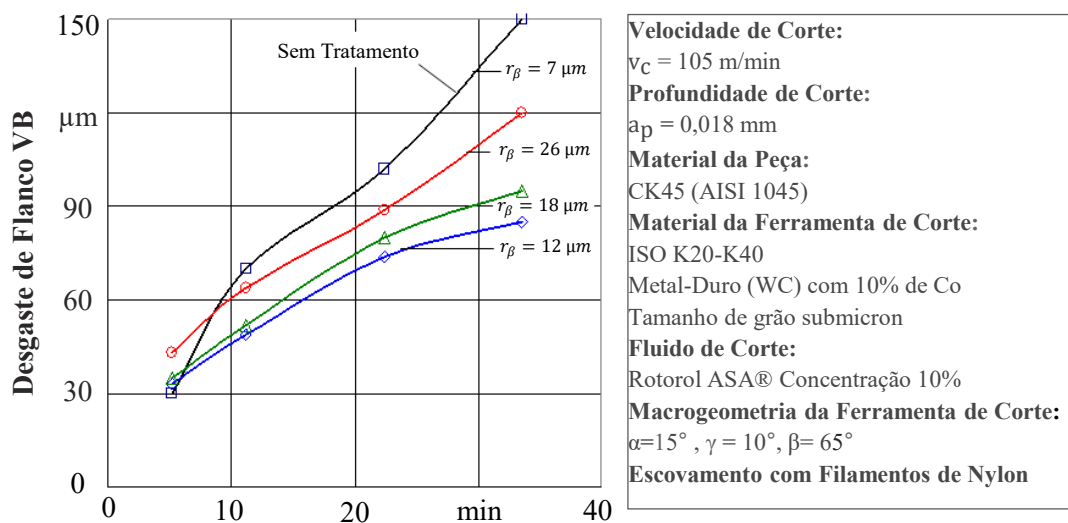
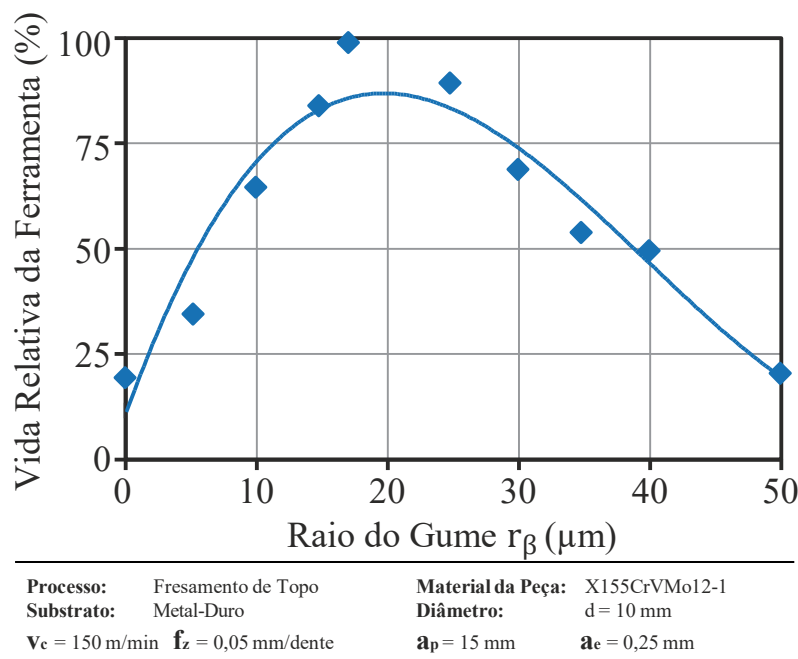


Figura 25. Influência do raio do gume no desgaste da ferramenta de corte (Adaptado de RODRÍGUEZ, 2009).

Rodríguez (2009) performou um ensaio de desgaste que utilizou insertos de metal-duro com quatro condições diferentes de microgeometria, nas quais variavam tamanho do arredondamento do gume. É possível verificar que o inserto sem preparação do gume possuiu um comportamento de desgaste indesejado, visto pela irregularidade da curva. Em pouco tempo de corte o mesmo já possui um desgaste de flanco elevado. Por outro lado, as ferramentas escovadas resultaram em um tempo de corte superior a ferramenta sem tratamento, para um mesmo desgaste do flanco. O diferencial se deu pelo tamanho do arredondamento. Neste teste, um leve arredondamento de 12  $\mu\text{m}$  sucedeu o menor desgaste do flanco entre as quatro condições.

A respeito do tamanho do raio do gume, geralmente se tem uma faixa ideal em que o desempenho da ferramenta atingirá o seu máximo, para uma aplicação específica. Na Figura 26 é possível ver a influência que o raio do gume têm na vida relativa da ferramenta, em um teste de fresamento de topo em um aço ferramenta DIN X155CrVMo12 – 1 (TIKAL, 2009).



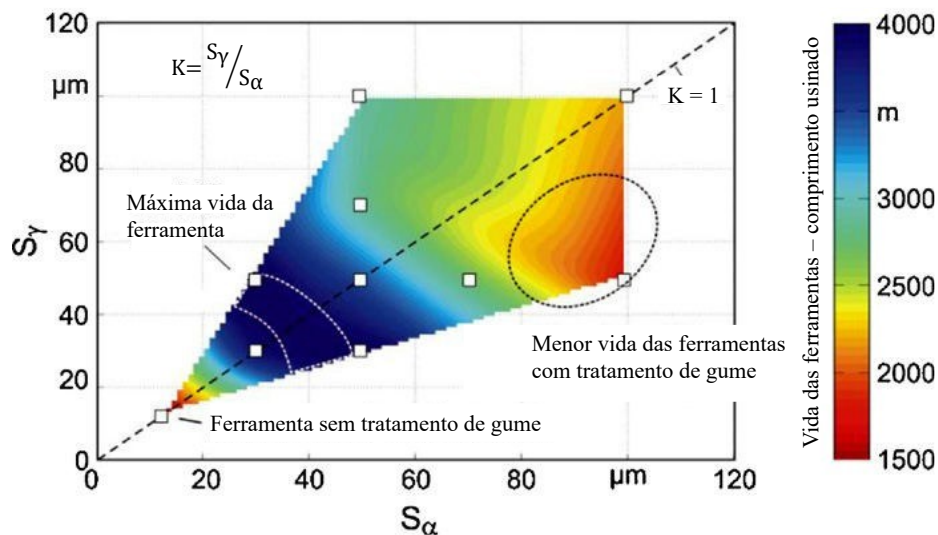
**Figura 26.** Relação do raio do gume em relação a vida relativa da ferramenta de corte (Adaptado de TIKAL, 2009).

No caso apresentado, a faixa ideal para o raio do gume é entre 15 – 25  $\mu\text{m}$ . A estabilidade do gume da ferramenta diminui com raios muito pequenos, que corresponde a uma fração pequena da vida obtida com a faixa de arredondamento ideal. Isto causa lascamentos e quebras do gume, que decretam o fim de vida da ferramenta. Em contrapartida, a medida que se aumenta a dimensão do raio do gume, as solicitações mecânicas e esforços térmicos aumentam. Isto também leva a um desgaste prematuro da ferramenta, que diminui a vida útil

da ferramenta drasticamente (TIKAL, 2009).

O principal ponto é que a faixa ideal para o raio do gume possui alta dependência do processo de usinagem, material a ser usinado, os parâmetros de corte e das características da ferramenta (diâmetro e macrogeometria). Por se tratar de dimensões micrométricas, esta faixa ideal de raio é sensível a alterações, portanto dimensões fora desta faixa são suscetíveis a queda na performance. Cada faixa de raio ideal deve ser identificada individualmente para cada aplicação (TIKAL, 2009; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Além do tamanho do arredondamento, o seu formato, caracterizado pelo fator de forma  $K$ , possui um efeito determinante no comportamento de desgaste da ferramenta. O desgaste de flanco e de cratera pode ser especificamente controlado pelo fator de forma  $K$ , como visto na Figura 27.



**Figura 27.** Relação do fator de forma  $K$  com a vida da ferramenta de corte (Adaptado de BASSET *et al.*, 2012).

Um aumento na seção do gume de corte  $S_\alpha$ , correspondente ao flanco da ferramenta, leva a um desenvolvimento mais forte do desgaste do flanco, enquanto a seção do gume de corte  $S_\gamma$  na face da ferramenta quase não tem influência. Em contrapartida, se  $S_\gamma$  for incrementado, causa uma ampliação no desgaste da cratera. A seção do gume de corte  $S_\alpha$ , por outro lado, não tem influência significativa sobre o desgaste por abrasão. A partir dessas constatações, pode-se concluir que um fator  $K > 1$  é vantajoso para aplicações nas quais o desgaste de flanco é predominante. Por outro lado, uma vida útil mais longa da ferramenta pode ser esperada com um fator  $K < 1$  no caso em que o desgaste de cratera é o principal (BASSET *et al.*, 2012, DENKENA *et al.*, 2014b; DENKENA *et al.*, 2012b).

Neste mesmo tópico, Maiss *et al.* (2017) também verificou a influência de gumes assimétricos na qualidade superficial da peça usinada, e com um fator  $K > 1$ , os esforços podem

ser diminuídos, bem como a rugosidade da peça.

O processo de tratamento de gume por escovamento foram utilizados em alguns estudos. Rodríguez (2009) em seu ensaio de torneamento em um aço CK45 também utilizou do processo de escovamento tanto por filamentos de nylon quanto por cerdas naturais, e as comparou com o jateamento abrasivo, como visto na Figura 28.

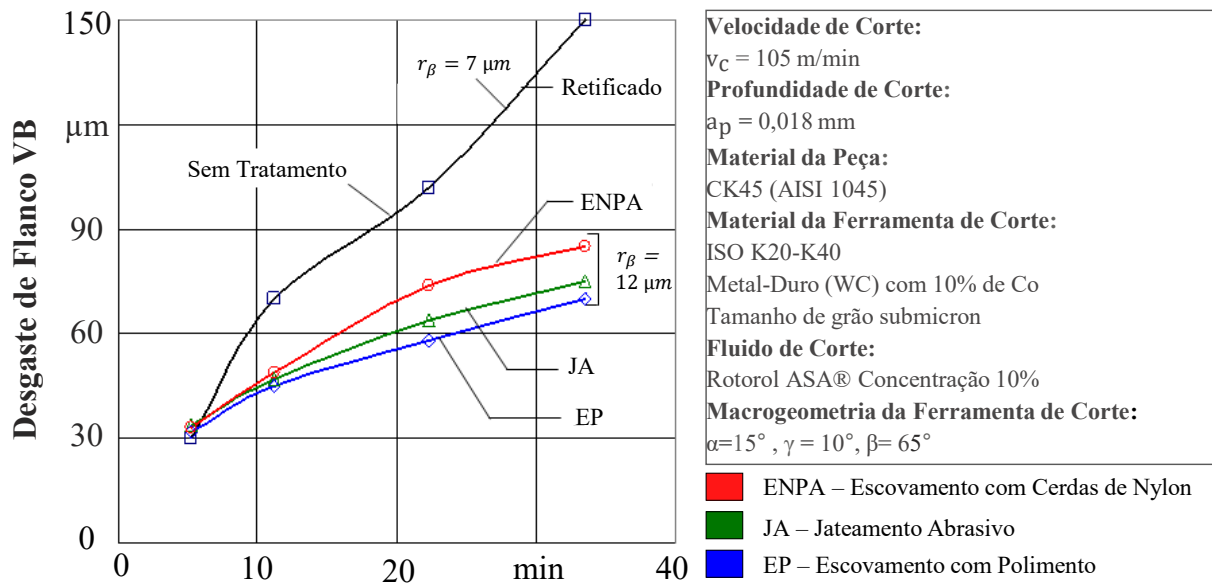


Figura 28. Comportamento de desgaste para diferentes tratamentos de gume (Adaptado de TIKAL, 2009).

No gráfico de comportamento de desgaste, a ferramenta retificada (sem tratamento) apresentou o maior desgaste do flanco. Já as ferramentas tratadas, que possuíam o mesmo tamanho do raio, foi observada uma redução de no mínimo 40% no desgaste de flanco. No geral, o escovamento com polimento (EP) foi a técnica que obteve a maior vida e o comportamento de desgaste mais estável. Isto se deve a uma melhor homogeneidade do gume de corte, dado pelos menores níveis de rugosidade e indecências de lascamentos. Pelo fato de utilizar pasta de diamante como meio de remoção de material, um maior refinamento da superfície era esperado.

Denkena *et al.* (2010) verificou a influência dos parâmetros do processo de escovagem na geração de diversas microgeometrias de insertos de metal-duro e o desgaste de flanco na usinagem do ferro fundido esferoidal. Dentre as nove combinações de microgeometria geradas, o arredondamento médio  $\bar{S}$  de  $30 \mu\text{m}$  e fator  $K < 1$  resultou na maior vida dos insertos. Já Basset *et al.* (2012) estudou diversos aspectos sobre o tratamento de gume pelo processo de escovamento de cerdas de nylon e SiC no torneamento de um aço AISI 1045. Nos ensaios, o escovamento auxiliou na remoção de defeitos no gume da ferramentas, e foi possível gerar diferentes tamanhos de arredondamento e fator de forma  $K$ . Na vida, arredondamentos  $\bar{S}$  na

faixa de 40  $\mu\text{m}$  foram os que obtiveram a maior vida para os insertos, bem como fatores  $K > 1$ .

Portanto, o processo de escovamento é um processo eficaz no tratamento de gume de ferramentas de corte, e obtiveram uma melhora significativa, dependendo do tamanho do arredondamento do gume. Além disso, esse processo foi capaz de criar variadas geometrias do gume.

Ao longo dos anos, alguns estudos foram feitos sobre o tratamento de gume de brocas helicoidal de metal-duro. No caso de furação de um aço AISI 1045 com brocas helicoidais de 14 mm de diâmetro, Biermann e Teryew (2008) verificaram o impacto do tamanho do raio do gume, e um raio maior de 60  $\mu\text{m}$  se mostrou superior ao de 20  $\mu\text{m}$  e o de 10  $\mu\text{m}$  (sem preparação). O desgaste de flanco foi reduzido. Este processo foi considerado de alta performance, dado pelos elevados parâmetros de corte utilizados. Em outro estudo de Biermann *et al.* (2012), foi utilizado brocas canhão de 5 mm de diâmetro na furação profunda do aço DIN 42CrMo4+QT com parâmetros de corte mais brandos. O raio em que se obteve a maior vida da ferramenta foi com um intermediário de 20  $\mu\text{m}$ , frente aos de 7  $\mu\text{m}$  (sem tratamento), 10  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$ . Portanto é possível verificar que vários fatores influenciam a escolha a faixa de raio em que a ferramenta terá o máximo de desempenho.

Ainda no processo de furação, Risse (2006), Biermann *et al.* (2008), Biermann *et al.* (2012), Bordin (2013), Biermann e Kirschner (2015), Santana (2015), Serafin (2025) e Wang *et al.* (2013) verificaram vários processos de tratamento de gume e sua influência em vários aspectos da usinagem. No geral, ferramentas tratadas obtiveram uma maior vida útil. Além disso, as forças envolvidas no processo de usinagem aumentaram, pois com um maior arredondamento, a área de contato peça-gume também se eleva. Por outro lado, a temperatura da peça usinada foi reduzida, fato causado pela rugosidade do gume ser menor, que induz menos distorções dimensionais e, conseqüentemente, resulta em uma superfície mais homogênea.

Em outros processos de usinagem como torneamento e fresamento, Bouzakis *et al.* (2014), Denkena *et al.* (2011), Denkena *et al.* (2012a); Biermann *et al.* (2007), Wang *et al.* (2020b), Denkena *et al.*, (2007), Fontanive *et al.* (2019), Biermann *et al.* (2016), Krebs *et al.* (2018), Wang *et al.* (2020b), Nardy *et al.* (2024) também verificam o impacto do tratamento de gume. Além da redução do desgaste de flanco e dos outros aspectos apontados anteriormente, foi visto que a adesão do revestimento foi melhorada e há um ligeiro aumento na temperatura do gume da ferramenta.

Nos últimos anos, o foco de pesquisa do tratamento de gume se dá em algumas frentes. Sobre o aprimoramento de processos já existentes, Lv *et al.* (2022) avaliaram o potencial de

abrasividade de diferentes mídias, utilizadas no processo por arraste. A sua influência está diretamente ligada a remoção de material, e a microgeometria gerada. Hartig (2024) utilizou do processo de retificação e avaliou o uso de rebolos com ligação elástica de várias durezas para performar o tratamento de gume de insertos, e verificou que a dureza impactou na geometria do gume gerada e seu posterior desempenho. Meijner *et al.* (2024) prepararam o gume de microfresas por meio do jateamento úmido, no qual geraram distintas microgeometrias assimétricas a partir da alteração dos parâmetros do jateamento. Desta forma, verificaram que o desgaste de flanco foi reduzido.

Além disto, novas técnicas geradas e seu potencial também são verificados. Riu Pedrix *et al.* (2024) utilizam de uma técnica chamada de eletropolimento para fazer o tratamento de gume de ferramentas de corte. Como resultados, constatou que esta técnica é eficaz em eliminar os defeitos no gume e melhorar a qualidade superficial. Huang *et al.* (2025a) se utilizou da combinação de processos conhecidos de tratamento por jateamento a seco e úmido para preparar o gume de insertos de metal-duro e gerar diferentes microgeometrias. Jäckel *et al.* (2025) utilizou da técnica de íons reativos no processo PVD para produzir diferentes microgeometrias no gume. Por fim, Huang *et al.* (2025b) se utilizaram do acabamento magnético combinado com o polimento abrasivo para remover material do gume, e verificou a influência dos parâmetros do processo no arredondamento gerado.

A influência do tratamento de gume em processos que são considerados difíceis como furação, torneamento duro, rosqueamento e serramento ainda são de interesse da indústria. O tratamento do gume é um componente central na produção de ferramentas de corte. Embora a tecnologia tenha sido amplamente utilizada na indústria durante muito tempo, existe ainda uma grande necessidade de desenvolvimento contínuo. Isto diz respeito aos métodos de preparação das ferramentas, à caracterização e medição do gume e à influência da microgeometria e da topografia das ferramentas não revestidas e revestidas no processo de usinagem (KLOCKE, 2018; DENKENA; BIERMANN, 2014).

Por estes motivos, o estudo a respeito do tratamento de gume por escovamento no processo de usinagem de furação, que por ser complexo e de alta utilização na indústria, é de suma importância. A literatura referente a estes tópicos combinados é escassa, portanto este trabalho agrega informações sobre o tratamento de gume em brocas helicoidais de metal-duro, na furação de um aço ferramenta AISI P20.

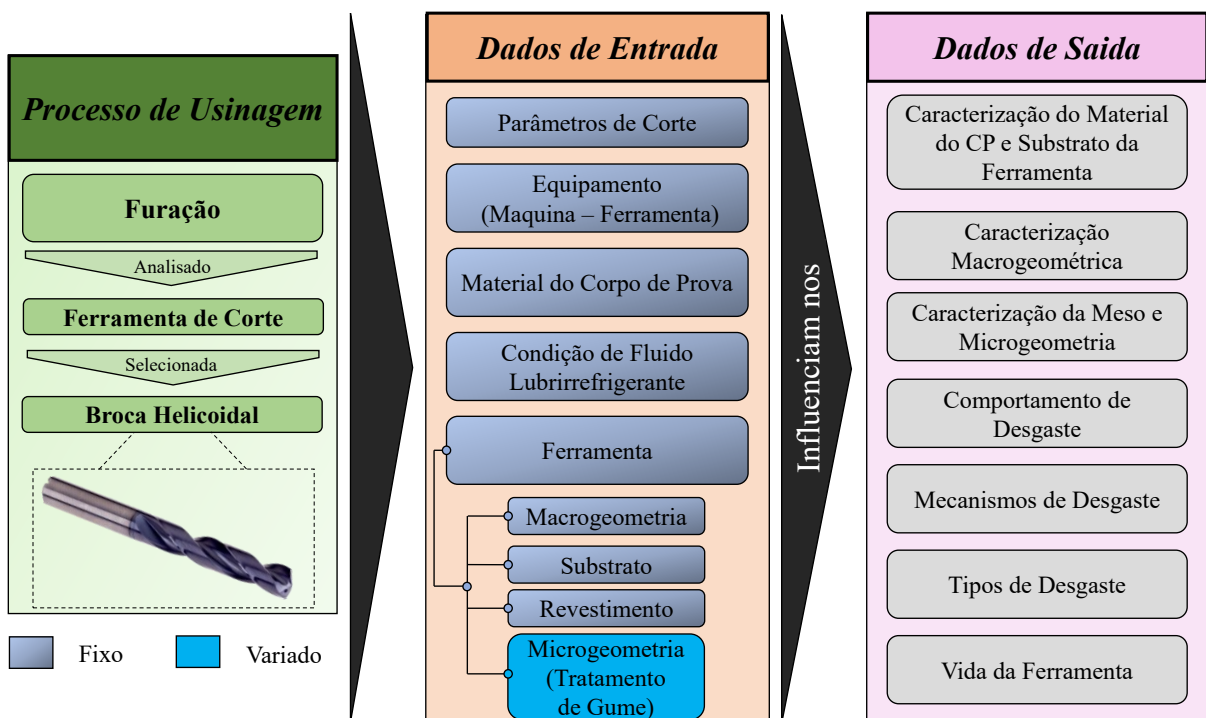
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foram apresentados os métodos experimentais utilizados, bem como o planejamento experimental, materiais, equipamentos e ferramental utilizado no experimento.

### 4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Esta seção engloba como foi feito o experimento, os dados que se mantiveram fixos e o que foi variado no experimento, além dos dados de saída avaliados. A observação de um sistema ou processo enquanto ele está em operação é fundamental para o processo de aprendizagem e compreensão de como estes funcionam. Porém, para entender as relações de causa e efeito em um sistema ou processo, é requerido alterar os dados de entrada e observar as consequências que essas alterações terão nos dados de saída. Esta observação permite criar hipóteses sobre o processo, mas para a comprovação das hipóteses é necessário a execução de experimentos (MONTGOMERY, 2017).

O planejamento experimental desenvolvido neste trabalho é visualizado na Figura 29.



**Figura 29.** Planejamento experimental (O autor, 2025).

No quadro verde à esquerda, foi primariamente definido o processo de usinagem e o tipo da ferramenta utilizados no ensaio. Após, foi determinado os dados de entradas do teste,

visto pelo quadro laranja. Além disto, foram selecionados os que permaneceram fixos e os que foram variados, de acordo com o objetivo do ensaio. O dado que foi variado influencia diretamente nos possíveis dados de saídas que foram avaliados, vistos no quadro rosa.

#### 4.1.1 Dados de Entrada

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da alteração da microgeometria do gume da ferramenta através do processo de tratamento de gume. No processo de furação são inúmeras variáveis que influenciam o processo, portanto a definição de quais se mantiveram fixas e quais foram variadas são imprescindíveis para toda a cadeia experimental conseguinte.

Com relação às condições do processo de usinagem, como a velocidade de corte e o avanço, foram mantidas constantes durante os ensaios. Os valores foram definidos através de pré-testes, exemplificado nas seções 4.2 e 5.3. Os parâmetros de corte estão evidenciados na Tabela 1.

Parâmetro	Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Profundidade da Furação (mm)
Valor	64	0,1	25,5

**Tabela 1.** Parâmetros de corte utilizados no ensaio (O autor, 2025).

A condição de fluido lubrificante se deu pela utilização de emulsão, utilizando o fluido da fabricante Blaser modelo Vasco 6000. A concentração da emulsão foi estipulada na faixa de  $9 \pm 1$  %. A utilização de fluido impacta os parâmetros de corte que podem ser utilizados em um processo de furação, porém como este parâmetro não foi alterado para todas as condições do teste, não foi um fator de análise nesse experimento.

O método da furação foi do tipo em cheio, sem pré-furo, quebra-cavacos e afins. Além disso, os furos foram feitos a  $0^\circ$  em relação a mesa de usinagem, de forma contínua, ciclo direto, e o espaçamento entre os furos foi de 2 mm ( $1,25 \cdot D$ ).

Para o ensaio, foram utilizadas duas condições de microgeometria do gume:

- a) Ferramenta com a microgeometria inalterada, chamada de Sem Tratamento (STD);
- b) Ferramenta cuja microgeometria foi alterada pelo processo de escovamento com polimento, chamada de Escovada (EP);

Para aumentar a confiabilidade dos resultados, nos ensaios de furação foram feitas duas réplicas para cada condição. Pelo Quadro 1 é possível verificar a ordem de ensaio e

características.

Teste	Codificação da Ferramenta	Tratamento de Gume	Ordem	Teste ou Réplica
1	Dormer #TESTE.UCS.10	Escovamento	1	Teste
2	Dormer #TESTE.UCS.11	Escovamento	3	Replica 01
3	Dormer #TESTE.UCS.12	Escovamento	6	Replica 02
4	Dormer #TESTE.UCS.07	Sem Tratamento	2	Teste
5	Dormer #TESTE.UCS.08	Sem Tratamento	4	Replica 01
6	Dormer #TESTE.UCS.09	Sem Tratamento	5	Replica 02

**Quadro 1.** Ferramental e condições (O autor, 2025).

A ordem dos ensaios seguiu de acordo com a intercalação entre as ferramenta. Ademais, cada ferramenta utilizou corpos de prova diferentes, para garantir que o material não seja um fator influente no desempenho das brocas no ensaio.

#### 4.1.2 Dados de Saída

Também chamadas de variáveis dependentes do processo, neste experimento foram analisados os dados de saída que se relacionam com a ferramenta, mais especificamente sobre a microgeometria e o desgaste. A caracterização do substrato da ferramenta e do material do corpo de prova foram realizados por meio das normativas padrões do LAMEC e LCMIC, em conjunto com a metodologia desenvolvida no GUS. A caracterização da macrogeometria da ferramenta foi feita com a utilização de algumas afirmações da normativa ISO 3685 (1993) e com base nos procedimentos padrões do GUS, que regem sobre a forma que é efetuada a análise das ferramentas de corte.

A respeito da caracterização da microgeometria e mesogeometria, foi efetuada de acordo com os parâmetros descritos por Denkena *et al.*, (2002). Além disto foi seguido a diretriz da VDI 2654 Blatt 2 (2020), que descreve uma série de padrões sobre a caracterização das ferramentas de corte, terminologia e os parâmetros de mensuração do gume. Em conjunto, inspeções visuais foram feitas utilizando técnicas como a metrologia óptica 3D (foco infinito) e o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Para verificar a vida útil e o comportamento de desgaste da ferramenta, é importante para quantificar e mensurar cada etapa do processo de usinagem. A cada determinado número de furos, previamente estabelecidos, a ferramenta foi retirada da máquina e medido os dados de interesse, além da análise microscópica para geração das imagens da macrogeometria da ferramenta e verificação dos tipos e mecanismos de desgastes presentes em cada instante. O

critério principal de avaliação foi através do desgaste de flanco  $VB_{MAX}$ . O ensaio se estenderá até que cada ferramenta chegue no critério de fim de vida para o desgaste máximo do flanco, definido como  $VB_{MAX} = 0,3$  mm. Este valor foi estabelecido de acordo com a literatura, em conjunto com os ensaios laboratoriais prévios do GUS e algumas diretrizes da norma ISO 3685 (1993). Um critério concomitante para o final de vida é referente a sobrecarga mecânica experienciada pela ferramenta, especificamente sobre lascamentos e entalhes. Ao atingir o mesmo valor numérico estipulado para o desgaste do flanco (0,3 mm), também decretará o final de vida desta ferramenta de corte.

Além disto, foi instaurado um critério de fim de teste, no qual o ensaio é encerrado ao ponto em que ferramenta chegar em um número máximo de furos, decretado em 1000 furos. Finalizados os ensaios, os valores numéricos de desgaste foram compilados para determinar a vida e o comportamento de desgaste dessas ferramentas.

Com os dados gerados, foi possível efetuar um tratamento estatístico para os dados de desgaste a partir de diferentes métodos, a partir do software Statistica. O objetivo desta abordagem visou compreender se houve coerência dos resultados dentro da amostragem, e também comparar entre as condições de microgeometria do gume. O primeiro método foi a partir de uma regressão dos dados de desgaste da condição STD e da EP com uma confiança de 95%. Na subdivisão, foram feitas análises residuais dos dados, comparando com os valores observados e uma correlação bivariada, que busca identificar como duas variáveis estão relacionadas.

Também foi feito uma análise de Durbin-Watson. Seu objetivo principal é verificar a autocorrelação dos valores residuais. A autocorrelação corresponde à associação entre os valores de uma mesma variável. Esta associação é comum quando os valores podem ser ordenados no tempo (com dados de séries temporais) ou no espaço (com dados espaciais). A presente tipologia analítica é frequentemente aplicada no contexto financeiro, onde o valor atual é influenciado pelo valor anterior (DURBIN; WATSON, 1950; DURBIN; WATSON, 1951; DODGE, 2008; KOTZ; JOHNSON, 1993).

#### **4.1.3 Material e Corpo de Prova**

Para o experimento, o material que foi utilizado nos corpos de prova é o aço AISI P20. Por outras normativas globais, ele é chamado de W.Nr 1.2311, DIN X40CrMnMo7, B.S. 4659 (USA P20) e AFNOR A35-590 2333 35CMD7. Os aços do grupo P são usados quase exclusivamente em matrizes de fundição sob pressão e em moldes para injeção de polímeros.

Para tal função, eles devem possuir uma boa tenacidade, resistência ao desgaste, resistência mecânica, elevada dureza a quente e a temperatura ambiente e um bom refinamento dos grãos (ASM, 1990; CHIAVERINI, 2012).

O material foi fornecido pela distribuidora GGD Metals, de um mesmo lote de fundição, para reduzir as discrepâncias do material quanto a composição, dureza e possíveis defeitos. Para obter maiores informações sobre a composição química e garantir que ela esteja dentro das especificações, foram efetuadas medições em 2 corpos de prova diferentes, com 2 amostras por CP, a partir do laudo técnico gerado pelo equipamento Spectro modelo SpectroLAB S. A Tabela 2 elucida a composição química em percentual mássico do AISI P20.

<b>Elemento</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Fe</b>
Média (%)	0,435	1,528	0,280	2,023	0,039	0,162	0,003	0,012	95,350
Desv. Pad. (%)	0,037	0,080	0,014	0,097	0,026	0,016	0,001	0,003	0,235
<b>Elemento</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Al</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>	<b>N</b>
Média (%)	0,008	0,033	0,028	0,005	0,020	0,014	0,015	0,007	0,026
Desv. Pad. (%)	0,002	0,012	0,005	0,001	0,007	0,001	0,000	0,001	0,017

**Tabela 2.** Composição química mensurada do aço AISI P20 (O autor, 2025).

Em conjunto, foi feita uma caracterização das propriedades mecânicas deste material, a partir de laudos técnicos do LAMEC, situados no Anexo B. Na Tabela 3 é possível verificar as principais propriedades para este material. Em conjunto, foi realizada uma caracterização metalográfica. A amostra foi preparada, polida com pasta de diamante de tamanho de grão inferior a 3  $\mu\text{m}$  e atacada com Nital 2%. A microestrutura do material foi visualizada através de microscópio ótico e do MEV.

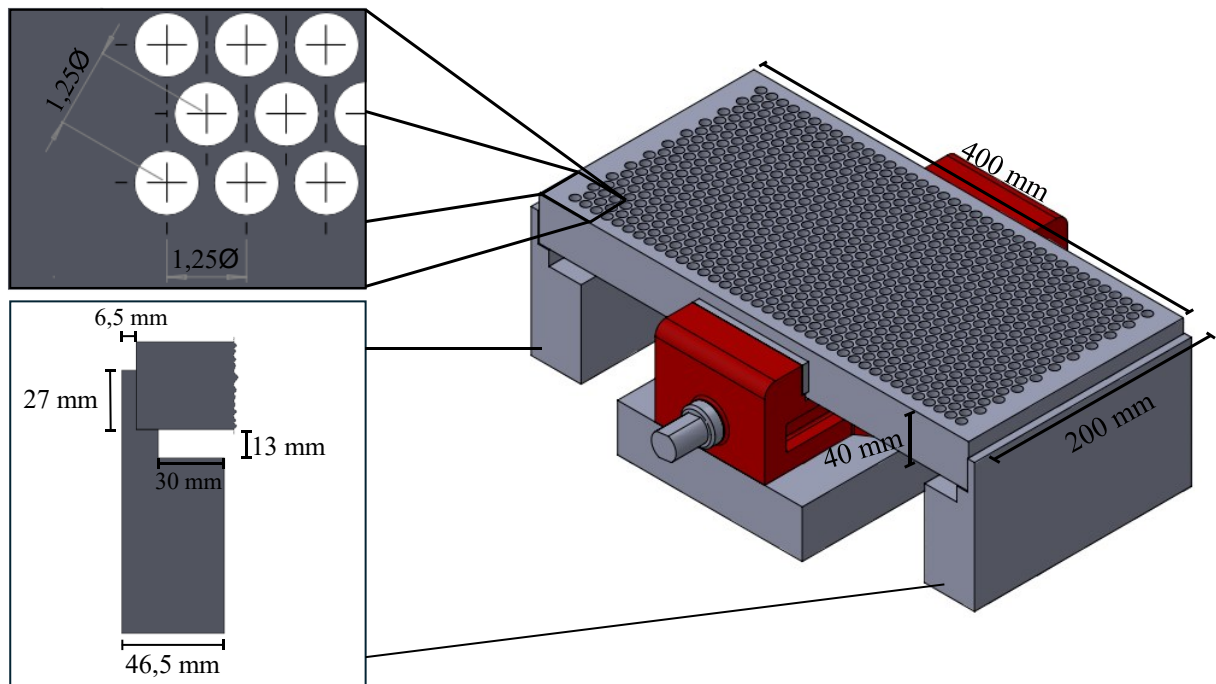
<b>Propriedade</b>	<b>Dureza (HRC)</b>	<b>Resistência ao Escoamento (MPa)</b>	<b>Resistência a Tração (MPa)</b>
Valor	$32,5 \pm 0,2$	$860 \pm 4,0$	$1039 \pm 1,0$

**Tabela 3.** Propriedades mecânicas resultantes para o aço AISI P20 (O autor, 2025).

As dimensões dos CP em estado de fornecimento eram de aproximadamente  $403 \pm 0,5$  mm de comprimento,  $202 \pm 0,4$  mm de largura e  $46,5 \pm 0,2$  mm de espessura. Para um ensaio experimental, há a necessidade de uma padronização dos CP's quanto a questões geométricas e dimensionais, para garantir uma repetibilidade dos testes e uma melhor fixação na máquina CNC. Para assegurar uma mesma grandeza dimensional entre as placas e a

planicidade das faces, os CP foram esquadrejados utilizando um cabeçote de fresamento de topo Dormer Pramet modelo 63A06R-S45HN09C-CF, portando insertos Pramet HNGX 0906ANSN-M. Após este processo, as dimensões finais do corpo de prova foram de 400 mm de comprimento, 200 mm de largura e 40 mm de espessura.

Pela Figura 30 é possível verificar como foi executada a fixação do corpo de prova na máquina CNC.



**Figura 30.** Fixação do corpo de prova e estratégia da furação (O autor, 2025).

Por conta das dimensões do corpo de prova, foi desenvolvido uma fixação inteiriça que apoiasse o CP pelo comprimento em ambas as extremidades. O objetivo foi para mitigar quaisquer momento fletor que pudesse ser gerado, além de garantir uma boa rigidez ao ser fixada e reduzir vibrações do conjunto durante o processo de furação. Portanto esse sistema de fixação garantiu que as placas ao serem fixadas adequadamente resultassem em um batimento ao longo do comprimento e da largura na faixa de  $35 \pm 15 \mu\text{m}$  e  $30 \pm 10 \mu\text{m}$ , respectivamente.

#### 4.1.4 Equipamentos

Para efetuar os testes experimentais, a máquina de usinagem utilizada foi da fabricante Hartford modelo LG-500, com potência de 12 kW, de 5,5 kW para o motor do fuso e rotação do *spindle* máxima de 10.000 rpm. O equipamento está localizado nas instalações do laboratório de usinagem, no bloco D da UCS. As brocas foram fixadas na máquina por meio de um mandril

hidráulico da marca Schunk modelo TENDO E compact, padrão de fixação SK40, com uma luva redutora de 20 mm para 8 mm. A medição do batimento das ferramentas e da planicidade dos corpos de prova quando fixados na morsa foi com a utilização de um relógio comparador da fabricante Mitutoyo, modelo 2046S com resolução de 0.01 mm. Para a fixação dos corpos de prova foi utilizada uma morsa mecânica da marca AMF-Industécnica, modelo MM-2, com uma força de fechamento máxima de 2000 kgf.

A análise da superfície da broca, tipos e mecanismos de desgaste, além do comportamento de desgaste foi efetuada com a utilização de um estereoscópio trinocular de medição, da fabricante Entex, modelo TNE-10B. Ele permite ampliações de 5 a 45 vezes, acoplado a uma câmera CCD para adquirir as imagens das ferramentas e as visualiza-las utilizando o software de edição de imagens ScopePhoto.

Para a medição da macrogeometria das ferramentas de corte, foi empregado o uso de um sistema automático de mensuração, da fabricante alemã Walter modelo Helicheck, com repetibilidade da medição de 1  $\mu\text{m}$ . Este equipamento permite verificar se cada critério analisado está de acordo com a especificação do fabricante.

Para a visualização de detalhes da microgeometria e microtopografia da ferramenta, foi utilizado o método espectroscópio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), da marca Tescan modelo Mira 3. Em conjunto com o MEV, foi utilizada a técnica de espectroscopia de dispersão de raios x por dispersão em energia, chamado de EDS. Com ele é possível analisar quantitativamente a composição química do ponto desejado, tanto para a caracterização do corpo de prova bem como nas brocas. O microscópio ótico Zeiss modelo Axio Imager 2 Pol foi usado na caracterização metalográfica do metal-duro e do material do corpo de prova. Em conjunto, o MEV e EDS também foram usados para a caracterização dos materiais.

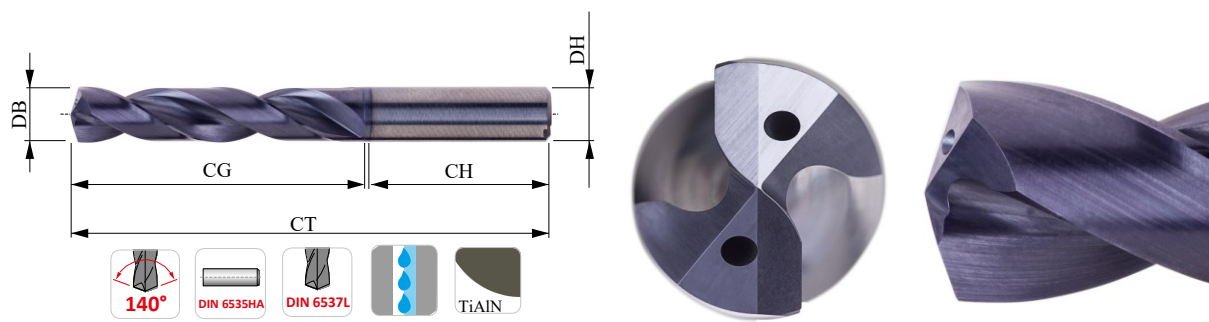
Por fim, para caracterizar a mesogeometria e microgeometria das ferramentas, foi utilizado um microscópio de foco infinito da marca Alicona modelo Edge Master Series. Este equipamento fornece um relatório detalhado, vistos no Anexo C, que incluem os parâmetros correspondentes ao fator de forma K. Assim, permitem uma caracterização detalhada e quantitativa da microgeometria do gume. No Anexo A é possível verificar a imagem dos equipamentos utilizados.

#### **4.1.5 Ferramentas**

Para a realização dessa dissertação foram utilizadas brocas da fabricante *Dormer Pramet* modelo Force M. Elas são do tipo helicoidal com dois gumes de corte, diâmetro nominal

de 8 mm, com canais internos para entrada de fluido lubrificador e é revestida com TiAlN.

Pela Figura 31 é possível visualizar algumas características macrogeométricas da broca. A tolerância dimensional da broca é H9 e a tolerância da classe é a m7. O substrato é o metal-ferro da classe MH10F, equivalente ao ISO K30, com uma dureza de 1600 HV10. Possui 10% de cobalto como material ligante, densidade de 14,45 g/cm<sup>3</sup> e seu tamanho de grão é submicron (0,5 – 0,8 μm). A afiação da broca segue o padrão da norma DIN 6537L (2020) e a haste de fixação é cilíndrica com está de acordo com a normativa DIN 6535 HA (2024). A profundidade máxima de furação é de cinco vezes o diâmetro (L/D = 5).



Seção	Diâmetro da Broca (DB)	Diâmetro da Haste (DH)	Comprimento da Haste (CH)	Comprimento do Gume (CG)	Comprimento Total (CT)
Valor	8	8	36	53	91
Ângulo de Ponta $\sigma$			140°	Ângulo de Cunha $\beta$	64°
Ângulo de Saida $\gamma$			3°	Angulo do Gume Transversal $\psi$	50°
Ângulo de Incidência $\alpha$			23°	Angulo de Quina $\epsilon$	110°

**Figura 31.** Características macrogeométrica da broca (O autor, 2025).

Pela normativa ISO 513 (2012), as brocas que foram utilizadas no experimento pertencem a classe ISO M e sua identificação é pela cor amarela. Em seu escopo a norma indica o uso primário em aços inoxidáveis austeníticos. Seu uso secundário são para os materiais inseridos na classe ISO S, que engloba ligas de titânio e ligas para alta temperatura com alto teor de níquel, cobalto e ferro. De acordo com a fabricante, esta broca não é indicada para o uso em materiais da classe ISO P, como o AISI P20. Portanto, o objetivo desta abordagem é puramente acadêmica, com o intuito de acelerar o desgaste da ferramenta e verificar o comportamento da mesma frente a esta condição desfavorável.

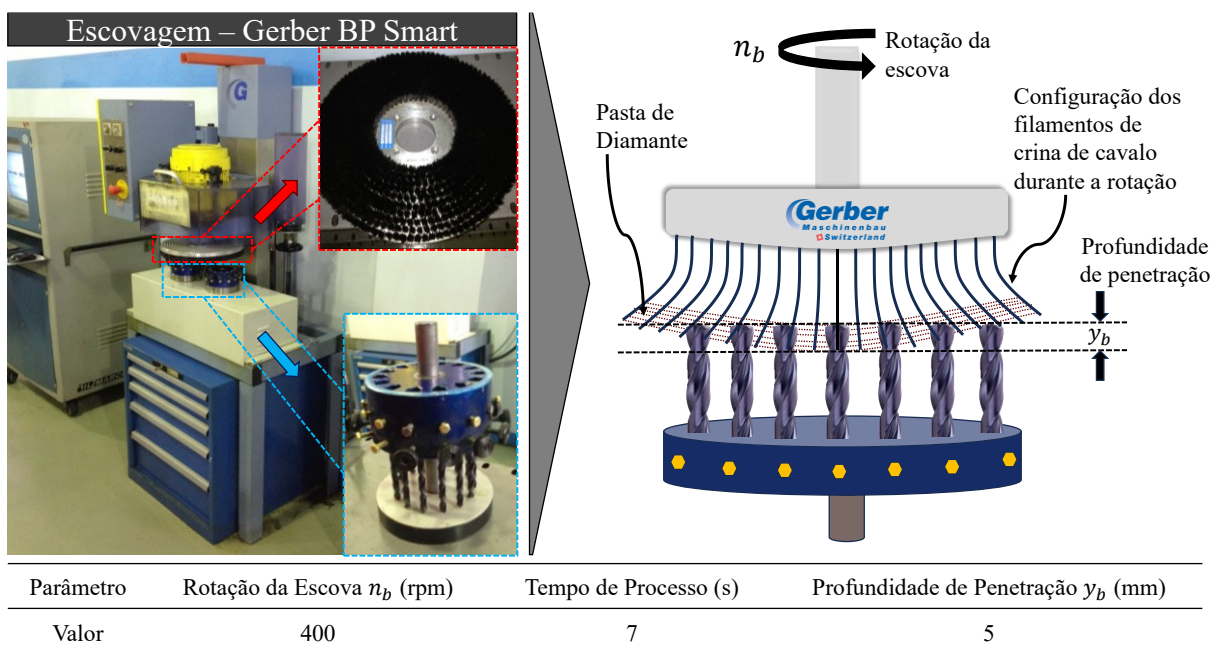
Após o processo de fabricação, as ferramentas foram caracterizadas antes e após o processo de tratamento de gume, de modo a verificar os impactos causados a mesogeometria e microgeometria das brocas. Os parâmetros do fator de forma K bem como o raio do gume foram

mensurados a uma distância de 1 mm da extremidade do gume da broca.

A respeito do gume da ferramenta, foi definido que para as ferramentas tratadas, o valor do raio médio ao longo da seção do gume abrangesse a faixa dos  $20 \pm 2 \mu\text{m}$ . Já o fator de forma K, foi estipulado uma faixa de  $1 \pm 0,1$ , que corresponde a uma arredondamento simétrico. Os valores foram definidos com base na literatura e em ensaios experimentais realizados pelo GUS. Portanto, os parâmetros do processo de tratamento de gume por escovagem foram selecionados para atender estes requisitos.

#### 4.1.5.1 Tratamento por Escovamento

Para o tratamento por escovamento, o tipo de processo selecionado para fazer o tratamento das brocas foi o escovamento com polimento. Portanto, foi utilizado uma máquina da fabricante suíça Gerber modelo BP Smart. Ela é especialmente indicada para o tratamento de ferramentas de corte como brocas, fresas e insertos. A escova é fornecida pelo próprio fabricante, no qual seu material é constituído de filamentos naturais provenientes da crina de cavalo, em conjunto com uma pasta de polimento de diamante, cuja granulometria está na faixa de  $3\text{-}5 \mu\text{m}$ . Para efetuar o tratamento do gume nas ferramentas, os parâmetros do processo foram uma rotação da escova de 400 rpm, uma profundidade de penetração dos filamentos de 5 mm a partir do vértice da ponta da broca por um tempo total de processo de 7 segundos, vistos na Figura 32.



**Figura 32.** Processo de escovamento (O autor, 2025).

Para garantir que as condições de desgaste da escova se aplicassem a todas as amostras, as brocas a serem tratadas foram colocadas em um porta ferramentas e o processo foi realizado no mesmo momento. Pelo fato de a mecânica de remoção de material da escova ser complexa, a posição na qual as brocas são colocadas em relação a passagem do filamento pode ligeiramente afetar o potencial de remoção de material do gume da ferramenta. Por isto, de acordo com Rodríguez (2009), é normal acontecer desvios dimensionais entre os gumes das ferramentas tratadas pelo processo de escovagem.

#### 4.2 PRÉ-TESTE

É de suma importância a execução de pré-testes em um ensaio de usinagem, pois com o mesmo, possibilita a retirada de informações cruciais sobre a seleção dos parâmetros de corte, comportamento de desgaste e vida da ferramenta. Nesta seção foi abordado como foi feito o procedimento experimental, planejamento e metodologias utilizadas a respeito do pré-teste.

As brocas utilizadas para o pré-teste foram da condição escovada (EP), pelo mesmo processo e parâmetros utilizados nas ferramentas do teste principal. Elas foram testadas a partir de diferentes parâmetros de corte, que possibilitassem identificar como a ferramenta se comporta ao longo de um certo número de furos. O objetivo foi selecionar uma condição de usinagem na qual a severidade não era demasiada, que trouxessem problemas mecânicos, como quebras ou fraturas. Além disto, problemas causados por altas temperaturas, como os mecanismos de desgaste de oxidação e difusão também foram evitados.

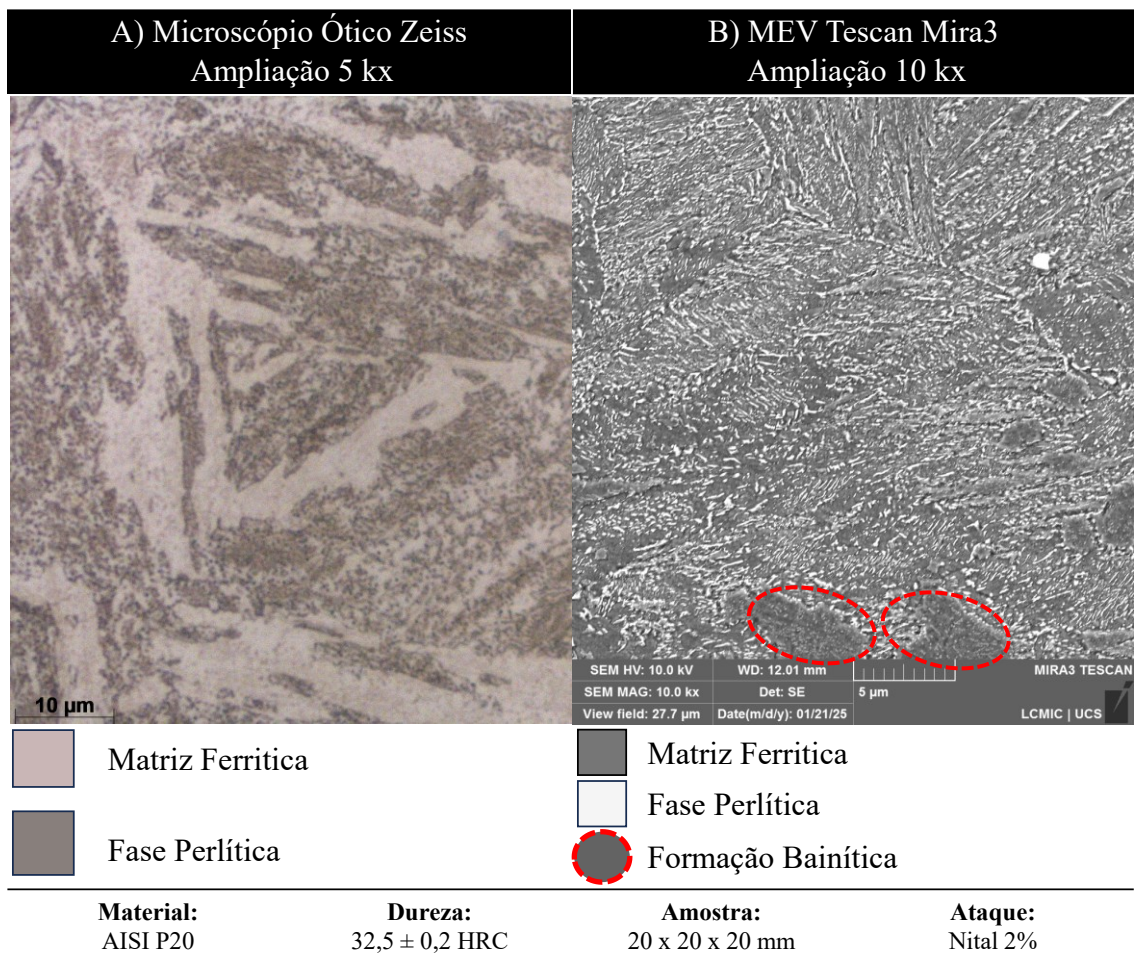
Da mesma forma que nos ensaios principais, os ensaios do pré-teste seguiram a normativa ISO 3685 (1993), que especifica algumas definições quanto à os procedimentos de testes de fim de vida, em conjunto com as definições utilizadas em ensaios laboratoriais executados pelo Grupo de Usinagem (GUS). O intervalo entre as medições de desgaste sofreu alterações conforme os resultados eram obtidos, portanto a melhor estratégia de medição foi desenvolvida no decorrer do pré-teste, para que a mesma fosse utilizada no teste experimental. Além disto, também foi avaliado o carregamento do *spindle* a partir dos dados da máquina CNC. O cavaco resultante do primeiro furo de cada ferramenta foi preservado para verificar alguma anomalia do processo. Na seção 5.3 deste trabalho é possível visualizar os resultados encontrados do pré-teste.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram apresentados os resultados das análises no substrato da broca, no material do corpo de prova, dos tratamentos de gume efetuados nas brocas e sua microgeometria resultante, além dos ensaios experimentais realizados.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO AISI P20

Para uma boa compreensão do processo de usinagem, o material da peça deve ser verificado. Para isto, foram realizados ensaios mecânicos e metalográficos para a caracterização do material, consultados no Anexo B. A microestrutura presente neste corpo de prova foi analisado por diferentes técnicas microscópicas e ampliações, conforme Figura 33.



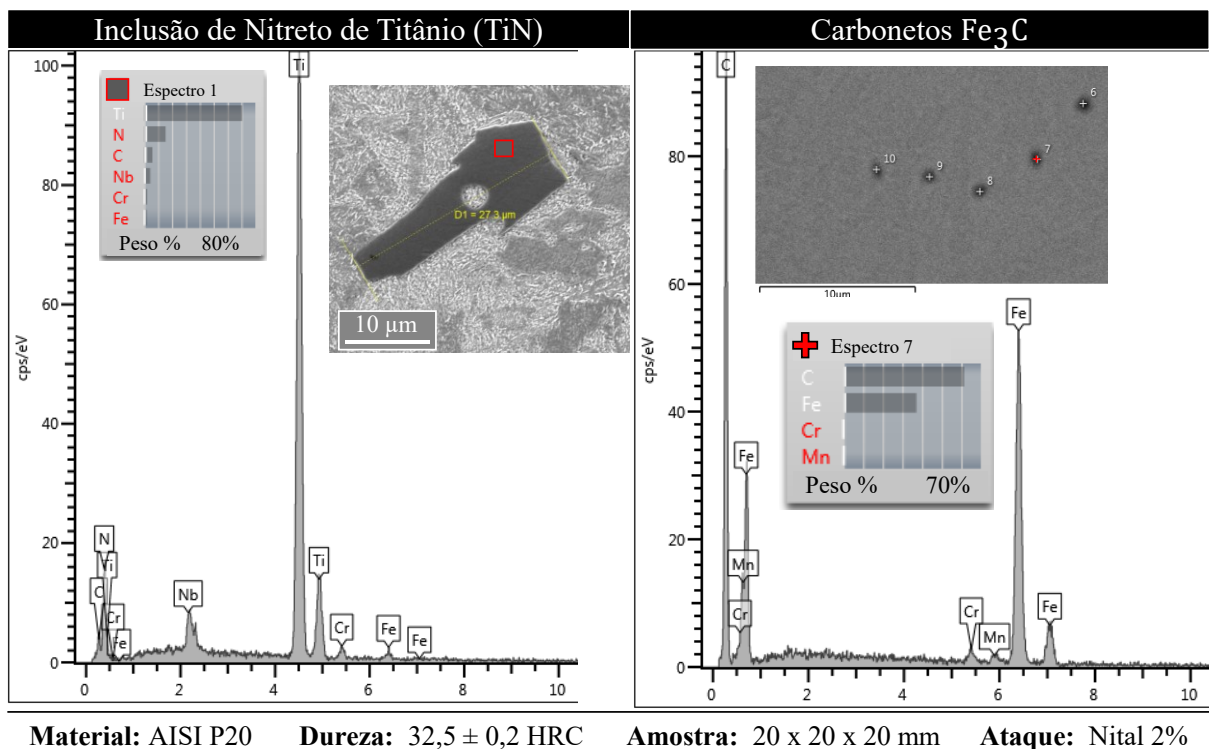
**Figura 33.** Caracterização da microestrutura presente no CP (O autor, 2025).

Na imagem A) visualiza-se a microestrutura revelada, para uma ampliação de 5k vezes. É possível identificar a matriz ferrítica, de cor clara, com uma fase perlítica, de cor

escura. A combinação resultante ferrítica mais perlítica é característica de um material que sofreu um resfriamento calmo a moderado. Ainda é possível visualizar a matriz ferrítica através da fase perlítica em certos pontos, portanto a perlita presente nesta microestrutura é considerada fina (ASM, 1992; ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2011; CALLISTER, 2006; CHIAVERINI, 2011).

A imagem B) foi captada pelo MEV, e em conjunto com o EDS, tem-se a comprovação de que a perlita presente nesta amostra é fina, dado pelos grãos finos e esparsos. Segundo Izotov *et al.*, (2007), as propriedades mecânicas do material aumentam com o maior refinamento da fase perlítica. Visualiza-se ainda o início de formação bainítica, que contribui para o incremento das propriedades mecânicas do material. Para a geração de bainita, deve haver um resfriamento moderado (LIU *et al.*, 1998; ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2011).

Na Figura 34, foram feitas análises com a utilização do detector de elétrons retroespalhados (BSE) somado ao EDS, com o intuito de verificar somente as partículas de alta densidade, Isso posto, é possível verificar a presença de carbonetos, dados pelo particulado preto, e a presença de inclusão de nitreto de titânio (TiN), com formato irregular.



**Figura 34.** Análise das inclusões presentes no CP por MEV e EDS (O autor, 2025).

Ambos influenciam diretamente na propriedades mecânicas. Inclusões de TiN são notórias por alterar a tribologia do material, que se torna mais abrasivo e menos resistente a

fratura. A presença de carbonetos no aço resulta no aumento da dureza local, diminuindo sua tenacidade (LI; ZHANG, 1989; ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2011).

A dispersão dos tamanhos de inclusões do particulado de TiN se deu na faixa de 6  $\mu\text{m}$  até aproximadamente 30  $\mu\text{m}$ . Houve um certo espaçamento entre estas inclusões, distribuídas de forma homogênea na amostra analisada. Já para os carbonetos ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), eles partiram de um tamanho de 0,1  $\mu\text{m}$  até o máximo de 3  $\mu\text{m}$ . Sua concentração era mais localizada em certas seções da amostra.

Portanto, em concordância com Askeland *et al.* (2011), Izotov *et al.* (2007), Priyadarshini *et al.* (2022), Liu *et al.* (1998), Chiaverini (2011), a amostra em questão trata-se de um AISI P20 em estado revenido, mas com um incremento das propriedades mecânicas, dado pela perlita fina, com uma certa quantidade de carbonetos e presença de inclusões de TiN.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA

Para verificar vários aspectos de uma ferramenta de corte, foi efetuada uma caracterização da ferramenta, partindo do seu substrato e revestimento, macrogeometria e por fim, a microgeometria.

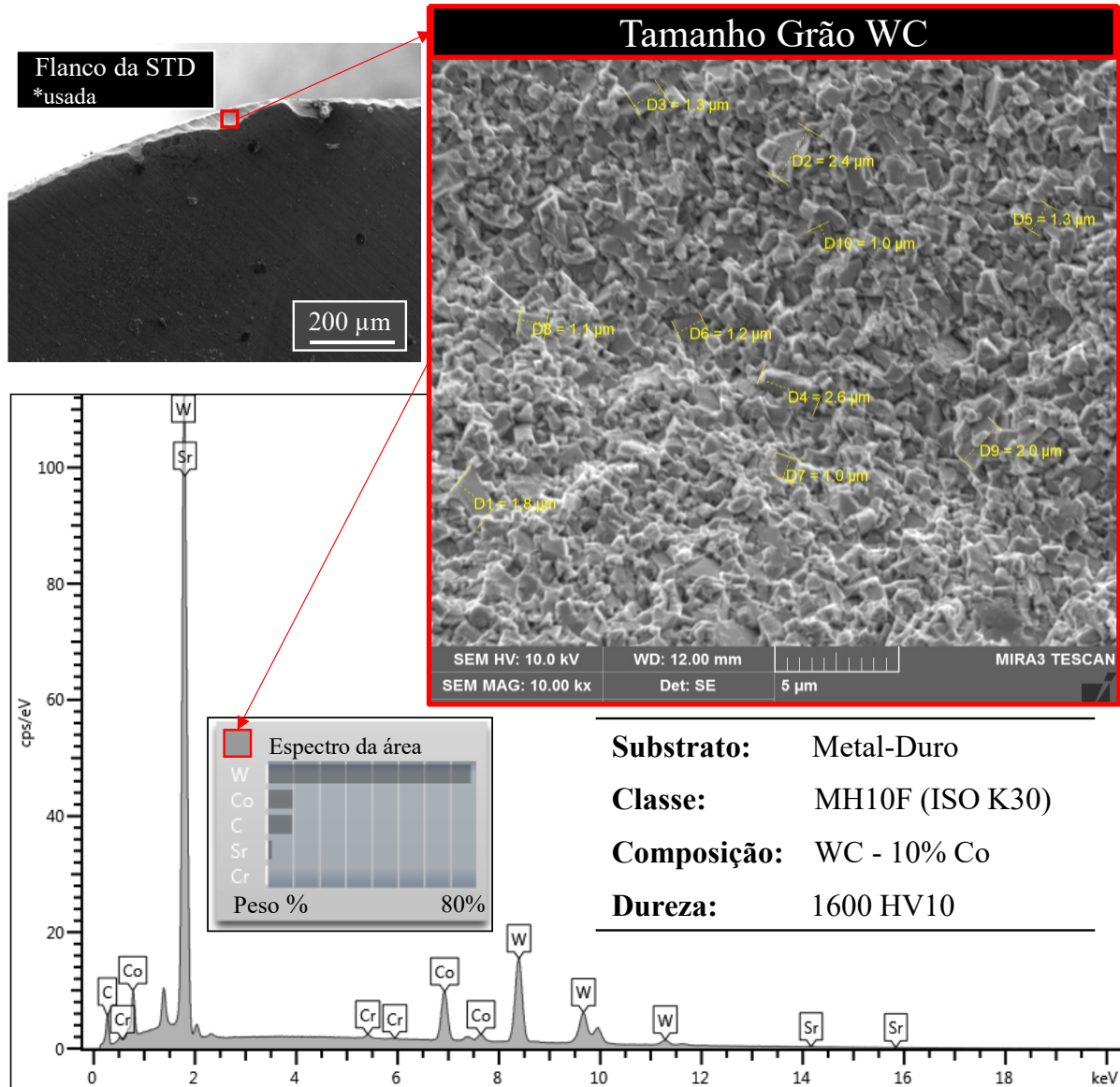
### 5.2.1 Substrato

O substrato de uma ferramenta de corte desempenha um papel importante no processo de usinagem, e seu impacto é visualizado nos diferentes aspectos da usinagem. Por este motivo, foi efetuada uma caracterização do substrato da broca e revestimento, por meio do MEV e EDS. Foram checados diversos aspectos, entre eles o tamanho de grão do WC, o material ligante e a espessura do revestimento da broca, os quais são importantes para o processo.

Na Figura 35 é observado o tamanho de grão do substrato utilizado nas brocas helicoidais. Os pontos de análises foram feitos em diferentes locais, dado pela abrasão presente nestes locais, que removeu o revestimento, e em pontos que ocorreram lascamentos.

A detecção do tamanho de grão de WC foi utilizando o método de elétrons secundários (SE). Em locais distintos de análise, foi possível mensurar o tamanho dos grãos, que variaram em uma faixa dimensional de 0,3  $\mu\text{m}$  até 2,6  $\mu\text{m}$ . Por conta da classe do metal-duro ser equivalente a ISO K30, sua classificação corresponde a um tamanho de grão submicron (0,5 a 0,8  $\mu\text{m}$ ). De acordo com Denkena *et al.* 2020 e Garcia *et al.* 2019, as propriedades mecânicas do substrato decorrem diretamente do tamanho de grão do WC. A medida que se diminui o

tamanho de grão, resulta em um aumento da dureza do material. Por outro lado, uma dispersão demasiada do tamanho de grão impacta diretamente na sua resistência a fratura, diminuindo-a.



**Figura 35.** Análise do tamanho de grão do WC e do espectro de elementos químicos presentes no substrato da broca por MEV e EDS (O autor, 2025).

De acordo com as especificações do fabricante do substrato, além do WC ele o possui cobalto como material ligante, com um percentual de 10%. Isto forma um sistema um sistema W-C-Co. Para avaliar as proporções de cada elemento químico, foi efetuado um EDS na seção demarcada, que resultou em percentual de tungstênio (W) que rege na casa dos 80%, seguido do carbono e do cobalto com 10% cada.

Ao verificar outros pontos da amostra, foi visto que a proporção dos elementos químicos está de acordo com o especificado, e que o ligante está bem acomodado no contorno

e entre os grãos de WC. As principais vantagens do cobalto em relação a outros ligantes, de acordo com Fernandes e Senos (2011), está relacionada às suas melhores características de cominuição na moagem, à sua maior molhabilidade para o WC, à sua maior solubilidade do WC em temperaturas de sinterização e às suas excelentes propriedades. O percentual de Co no substrato também influencia nas propriedades mecânicas, pois com o seu incremento, há uma redução na dureza do substrato. Por outro lado, há um aumento da tenacidade e, consequentemente, resistência a fraturas (GARCIA *et al.*, 2019).

Por sua vez, o revestimento da ferramenta também foi avaliado, como visualizado na Figura 36. Os elementos químicos presentes indicam que o mesmo contém titânio, nitrogênio e alumínio, que correspondem com o especificado pelo fabricante (TiAlN). O revestimento se mostra bem aderido no substrato, visto que o mesmo copia a superfície o qual ele está depositado e não houve sinais de deslocamentos.

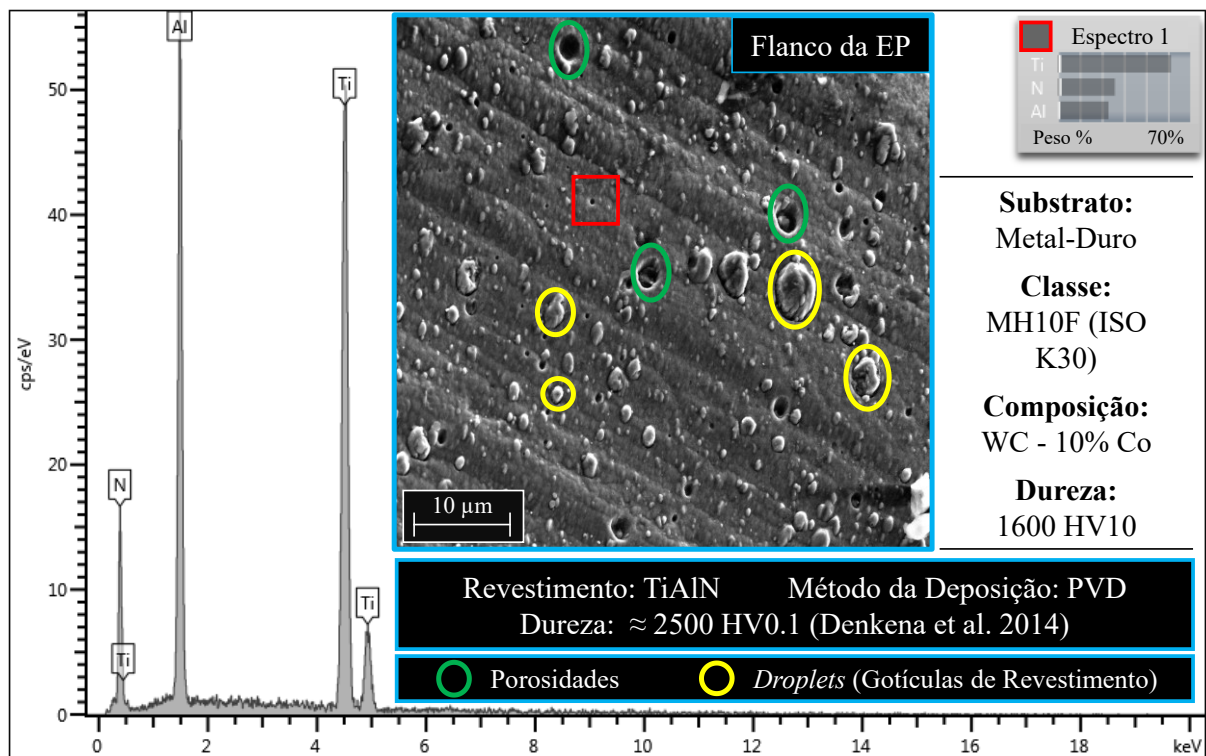


Figura 36. Análise do revestimento da broca (O autor, 2025).

Porém, é possível verificar a presença de defeitos microestruturais no revestimento como porosidades e gotículas de revestimento, da ordem de grandeza de 0,5 µm a 5 µm, provenientes do processo de deposição física de vapor (PVD). A depender da intensidade dos defeitos, podem influenciar diretamente no desempenho do revestimento, na questão de resistência a fricção, desgaste, oxidação e corrosão (PANJAN *et al.*, 2020).

Já espessura do revestimento foi verificada em uma seção do gume onde ocorreu um lascamento, para que fosse possível sua mensuração. Os valores variam na faixa de 1,5 a 6  $\mu\text{m}$ , a depender do ponto de análise. Esta variação da espessura pode se dar pelo local onde é feita a deposição do revestimento e pela técnica utilizada. Denkena *et al.* 2020 e Vopát *et al.* 2017 avaliaram a espessura do revestimento de insertos de metal-duro, e os resultados encontrados estão na faixa de 2 a 4  $\mu\text{m}$  portanto, essa variação de espessura é aceitável, visto o tipo e dimensões da ferramenta avaliada.

### 5.2.2 Macrogeometria

A avaliação da macrogeometria da ferramenta foi realizada a partir de duas formas. A primeira, com um método de avaliação qualitativo, e a segunda, a partir de uma análise quantitativa. A primeira foi feita com o uso do estereoscópio, em diferentes seções da broca, para verificar questões ligadas ao processo de fabricação da ferramenta de corte. Os principais pontos de análise foram o topo da broca (gume transversal e o flanco), face, guia e quina. Na Figura 37, é possível visualizar a geometria da ferramenta nas duas condições distintas, pelas lentes do estereoscópio.

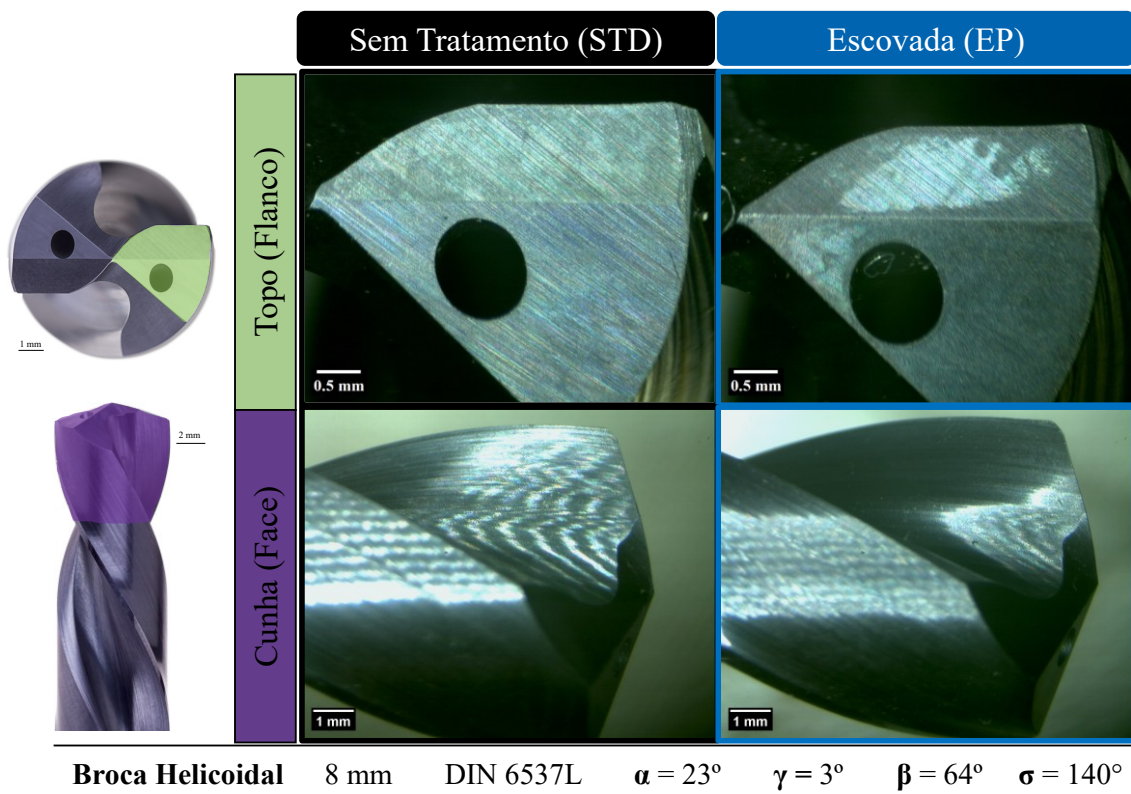


Figura 37. Macrogeometria das brocas (O autor, 2025).

Tanto no vista do topo da ferramenta quanto na face, é possível verificar que o padrão de afiação está concordante com o especificado e não possui defeitos visíveis, para ambas as condições. Além disto, no gume transversal, guia e quina também não foi encontrado discrepâncias visuais sobre a geometria da ferramenta. Portanto, é possível concluir que a macrogeometria da ferramenta foi igual para as duas condições.

Autores como Williams (1974), Tsai e Wu (1978), Astakhov (2010) e Ke *et al.* (2005) afirmam em seus estudos que o padrão de afiação da ferramenta e desvios geométricos a respeito da macrogeometria podem afetar diretamente os esforços mecânicos e térmicos da ferramenta. Os ângulos que compõem uma ferramenta de corte definem a sua interação direta com a mecânica do corte. Questões como o mecanismo de formação de cavaco, forças exercidas, distribuição de temperatura e principalmente, a vida da ferramenta são mais afetadas.

A segunda análise, de forma quantitativa, foi realizada em alguns pontos da macrogeometria das brocas, checados através de uma varredura performada no equipamento Helicheck. A comparação se deu acordo entre os parâmetros dimensionais de projeto, especificados para este modelo de broca, em relação ao mensurado na brocas, após a fabricação. Este método de medição fornece dados que permitem controlar se as ferramentas estão dentro da tolerância definida pelo fabricante, afim de assegurar as especificações desejadas. Na Tabela 4 se vê os valores gerados pelo equipamento em diversos pontos da macrogeometria da ferramenta de corte.

Valor / Critério	Diâmetro (mm)	Ângulo Ponta $\sigma$ (°)	Ângulo Saida $\gamma$ (°)	Ângulo Folga $\alpha$ (°)
Nominal	8,0000	140	3	23
STD	8,0158	139,464	0,741	22,499
EP	8,0195	139,386	0,083	22,992

**Tabela 4.** Relatório do Helicheck dos principais pontos da geometria da broca(O autor, 2025).

O diâmetro da ferramenta é de suma importância, para garantir que a cavidade gerada se encontre dentro da faixa dimensional esperada, principalmente a respeito da circularidade e cilindridade. As duas condições das brocas estavam dentro da tolerância definida. Os principais ângulos da ferramenta, como os ângulos de incidência e o de ponta também se mostraram dentro da tolerância, mas o ângulo de saída estava ligeiramente fora da especificação.

### 5.2.3 Microgeometria e Mesogeometria

A última análise performada nas brocas foi na geometria do gume, que contemplou a microgeometria e a mesogeometria. Para isto, se utilizou de artifícios como o MEV e o Alicona, com o objetivo de corretamente caracterizar o gume, tanto por parâmetros quantificáveis, quanto de forma visual.

Os parâmetros de caracterização do gume, gerados a partir das medições no Alicona, estão dispostos na Tabela 5. Estes parâmetros advêm do método de caracterização proposto por Denkena em 2002, chamado de fator de forma K (DENKENA *et al.*, 2002). As medições foram efetuadas em 100 pontos ao longo de um comprimento total da medição 900  $\mu\text{m}$ . Os dois gumes de uma broca foram avaliados individualmente para cada condição, que contemplou o desvio padrão das medições. Além dos parâmetros de caracterização do gume, os ângulos de saída, de incidência e de cunha também foram mensurados.

Condição do Gume	Sem Tratamento (STD)		Escovado (EP)	
	Gume 1	Gume 2	Gume 1	Gume 2
$r_{\beta}$ ( $\mu\text{m}$ )	$9,267 \pm 1,108$	$9,580 \pm 0,755$	$18,630 \pm 0,419$	$19,222 \pm 0,783$
$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	$24,958 \pm 0,066$	$25,599 \pm 0,183$	$24,038 \pm 0,018$	$23,885 \pm 0,024$
$\beta$ ( $^{\circ}$ )	$64,133 \pm 0,830$	$63,527 \pm 0,649$	$64,311 \pm 1,884$	$64,529 \pm 1,858$
$\gamma$ ( $^{\circ}$ )	$0,889 \pm 0,822$	$0,874 \pm 0,807$	$1,651 \pm 1,895$	$1,586 \pm 1,880$
$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	$130\text{E-}9 \pm 471\text{E-}9$	$133\text{E-}9 \pm 533\text{E-}9$	$53\text{E-}9 \pm 549\text{E-}9$	$39\text{E-}9 \pm 485\text{E-}9$
$S\alpha$ ( $\mu\text{m}$ )	$12,812 \pm 1,461$	$13,263 \pm 1,045$	$30,431 \pm 1,246$	$30,363 \pm 1,049$
$S\gamma$ ( $\mu\text{m}$ )	$17,304 \pm 3,547$	$17,758 \pm 1,923$	$28,011 \pm 1,096$	$29,275 \pm 0,905$
K (-)	$1,352 \pm 0,233$	$1,339 \pm 0,094$	$0,921 \pm 0,017$	$0,965 \pm 0,024$
$\Delta r$ ( $\mu\text{m}$ )	$8,641 \pm 1,190$	$9,158 \pm 0,866$	$17,700 \pm 1,136$	$18,364 \pm 0,807$

**Tabela 5.** Parâmetros de caracterização do gume a partir do Alicona (O autor, 2025).

O parâmetro do raio do gume  $r_{\beta}$  foi o primeiro item verificado. Na condição da broca STD, o tamanho do arredondamento foi o menor, fato este derivativo do processo de fabricação da ferramenta. No processo de retificação, o encontro dos rebolos abrasivos ao efetuar a afiação da ferramenta, resulta em um gume afiado com um pequeno arredondamento. Ainda pode-se observar um elevado desvio padrão para o arredondamento, na faixa de 1  $\mu\text{m}$ , que indica uma microtopografia variada e não homogênea ao longo da seção do gume.

Já para a ferramenta que passou pelo tratamento de escovagem, identificou-se um

aumento do raio do gume para um valor médio de 19  $\mu\text{m}$ , aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  a mais em comparação com a STD. Além disto, a dispersão dos valores do raio ao longo da seção medida foi reduzido para um valor mais adequado. Isto indica que a premissa do tratamento de gume foi realizada, com uma nivelção da microtopografia por meio da remoção de material.

Nos trabalhos de Denkena *et al.* (2009), Tikal (2009), Ost (2016), Denkena *et al.* (2010), Rodríguez (2009), Frank e Otto (2019), que utilizaram o processo de escovamento para tratar as ferramentas, obtiveram resultados similares na caracterização da geometria do gume. Foi notado um aumento do raio do gume e redução da dispersão dos valores em comparação com uma ferramenta sem tratamento.

A respeito do método do fator de forma K, é possível verificar algumas diferenças. Na broca STD, o gume tem um fator K superior a 1, que indica o arredondamento maior a favor da face da ferramenta, em um formato de trompete. A dispersão dos valores não se mostrou adequada, visto as diferenças ao longo da seção mensurada e também entre os gumes. Neste caso, o fator de forma resultante é totalmente decorrente do processo de fabricação da ferramenta, portanto não se possui controle sobre o mesmo (DENKENA; BIERMANN, 2014).

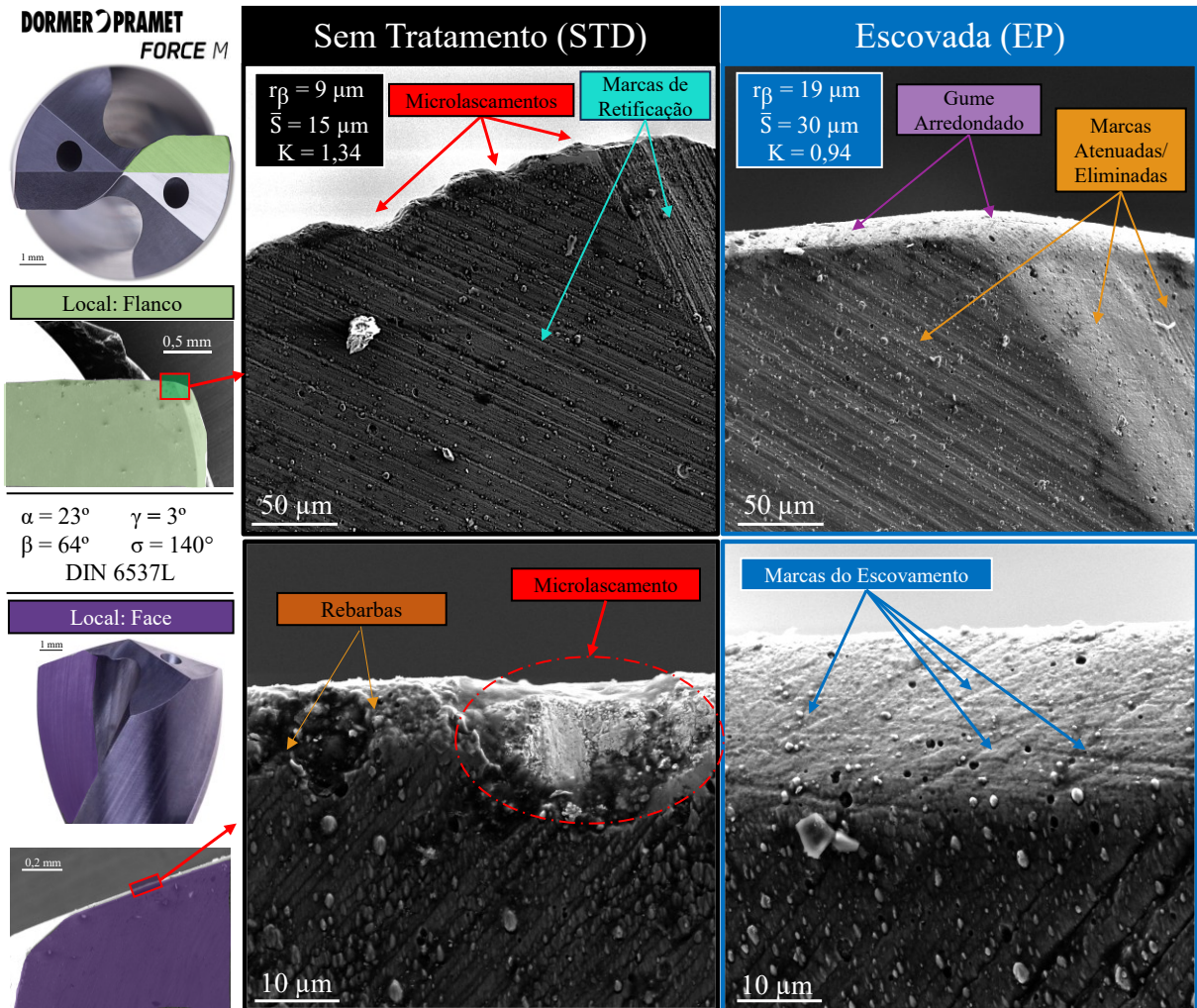
Por outro lado na broca EP, o fator K se mostrou próximo a 1, no qual corresponde a um arredondamento simétrico. A dispersão a respeito do K foi considerado adequado, que corroborou para uma superfície homogênea ao longo da seção. Ventura *et al.* (2017), Denkena *et al.* (2014), Vozár *et al.* (2020), Li *et al.* (2023) constataram ainda que os parâmetros de cada processo e suas combinações definem a quantidade de remoção de material. Isto afeta diretamente o tamanho do arredondamento e a forma do gume gerado.

Por fim, ainda foram visualizados os ângulos da cunha de corte a partir do emprego do Alicona. Em comparação com o que foi analisado no Helicheck, mínimas diferenças foram notadas, visto que ambos possuem um desvio padrão satisfatório, estão em concordância.

Na sequência, foi empregada uma abordagem visual, por meio da visualização da microgeometria do gume no MEV. Ele foi analisado tanto da visão flanco das brocas quanto da face, para verificar se o tratamento de gume gerou alterações nestas regiões, como visto na Figura 38.

Na vista do flanco, é possível verificar que as marcas do processo de retificação estão mais protuberantes na condição STD, principalmente na quina e chanfro da ferramenta. Foi identificado a presença de microlascamentos ao longo de toda a extensão do gume de corte, e pequenas rebarbas. Os grãos abrasivos do rebolo, na sua passagem pelo substrato para gerar a geometria da ferramenta, produziu uma superfície com notáveis irregularidades. Pelo fato de o

abrasivo utilizado no rebolo não ter geometria definida, o contato na ferramenta não é uniforme, e pode resultar em imperfeições em partes específicas (DENKENA;BIERMANN, 2014; TIKAL, 2009).



**Figura 38.** Visualização da microgeometria do gume, pelo MEV (O autor, 2025).

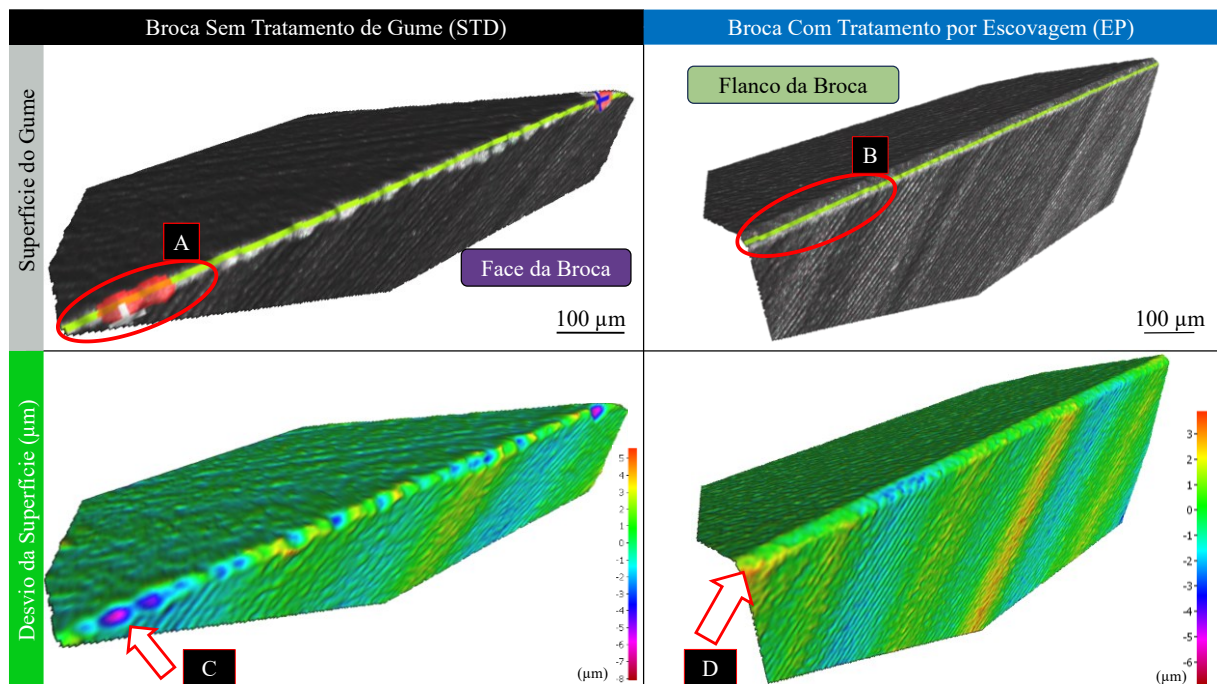
Na face da ferramenta STD, os mesmos defeitos no gume podem ser vistos, além das rebarbas. Defeitos desta magnitude prejudicam processos posteriores, como a deposição de revestimento na superfície do gume. Isto pode induzir a maiores possibilidades de deslocamento do revestimento, que prejudica o desempenho da ferramenta (RODRÍGUEZ, 2009; DENKENA *et al.*, 2014b).

Ao analisar a microgeometria da broca escovada, há uma redução expressiva das marcas de retificação no flanco e principalmente na quina da ferramenta. Os cantos vivos presentes na condição STD foram atenuados após a preparação, que suavizaram a transição do flanco para a quina quanto para o gume da broca EP. A superfície do gume de corte se tornou mais homogênea, em comparação com a broca sem tratamento. Isto se deve a remoção dos

defeitos e imperfeições por meio dos filamentos de crina de cavalo que portavam a pasta de polimento abrasiva. Além disto, é possível ver marcas brandas deixadas pelos filamentos da escova ao remover o material do substrato. Segundo Overhosler *et al.* (2003) elas não seguem uma orientação específicas, motivo dado a característica do mecanismo de remoção de material da escova, dependente da posição da ferramenta em relação aos filamentos e também do sentido de rotação da escova.

Nos estudos referentes a brocas helicoidais de metal-duro, Risse (2006), Bordin e Zeilmann (2014), Biermann *et al.* (2012) obtiveram resultados similares na caracterização do gume de brocas de metal-duro com e sem preparação. Kipp *et al.* (2021) se utilizou do processo por acabamento magnético para melhorar a microgeometria de brocas de metal-duro, que também obteve resultados satisfatórios. Fontanive *et al.* (2019), Zeilmann *et al.* (2018) e Ost (2016) performaram testes em com fresas de topo tratadas, e a condição da microgeometria do gume também foi melhorada com o tratamento por escovagem.

Além da análise do MEV, a microgeometria e microtopografia do gume coram caracterizadas por meio do Alicona. O objetivo foi verificar os desvios geométricos da superfície, a partir de um mapa de calor, de acordo com a Figura 39. Esta seção foi a mesma na qual foram mensurados os parâmetros de caracterização do gume.



**Figura 39.** Vista da microgeometria do gume principal, gerada no Alicona (O autor, 2025).

Para a broca STD, é possível verificar que o gume possui imperfeições e defeitos (A), que são mais notados a partir do desvio da superfície e apresentam diversas irregularidades (C).

Os desvios dos picos podem chegar até 5  $\mu\text{m}$  enquanto há vales que chegam até 7  $\mu\text{m}$  de tamanho, que totaliza um delta de 12  $\mu\text{m}$  na microtopografia. Isto implica em um gume desigual ao longo da superfície analisada. Como visto, estes defeitos advêm do processo de fabricação da ferramenta, que afetam negativamente a rugosidade da superficial da ferramenta bem como da superfície usinada (HASSELDER; UHLMANN, 2021; BEBLEIN; KRÖDEL, 2019).

A superfície da ferramenta escovada (EP) obteve uma melhora (B) em comparação com a STD. A dispersão dos valores ao longo do gume não ultrapassa os 5  $\mu\text{m}$ . Além disto, as marcas de retificação foram reduzidas, com menor picos e vales (D), que resulta em uma microgeometria mais homogênea. Beblein e Krödel (2019) performaram uma análise com a utilização do Alicona para verificar a microgeometria e rugosidade de fresas de topo. Em seus resultados, também verificaram uma homogeneização da superfície e redução da rugosidade tanto da face quanto do flanco da ferramenta.

A mesogeometria das brocas também foram analisadas por meio do Alicona, em um ponto específico do contorno do gume, conforme Figura 40. Por ele, é possível identificar a forma do contorno, que complementa caracterização da geometria do gume.

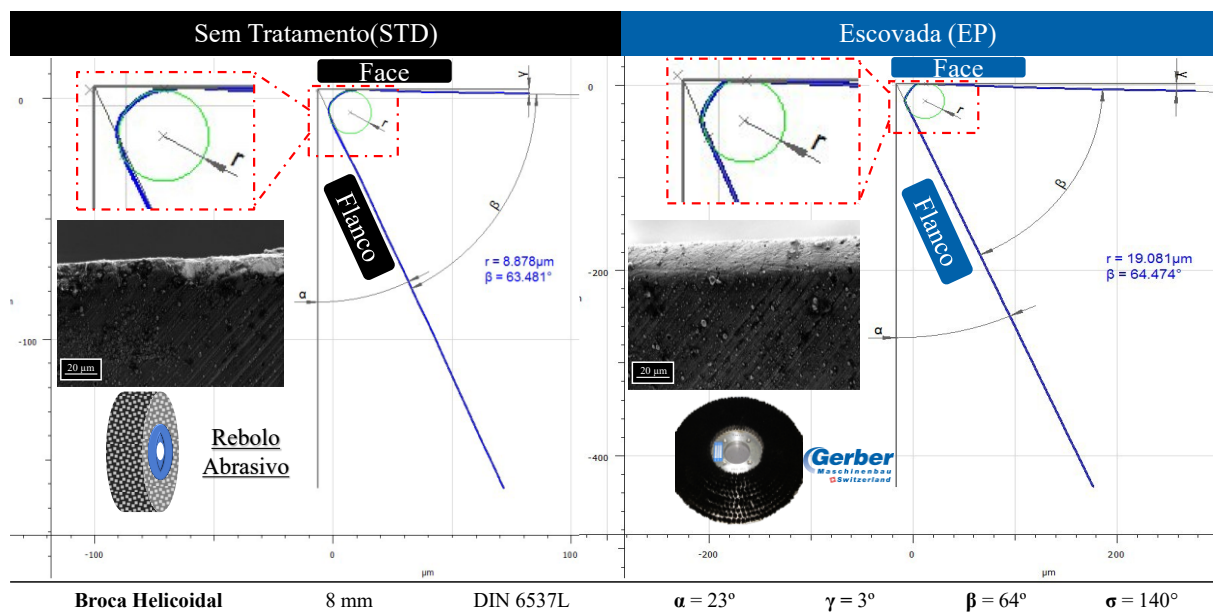


Figura 40. Mesogeometria do gume das brocas (O autor, 2025).

O contorno mensurado da ferramenta STD corresponde ao arredondamento assimétrico, pelo fato do fator de forma  $K$  ser superior a 1, o valor de  $S\gamma$  é maior que o de  $S\alpha$ , portanto também pelo contorno do gume percebe-se que o arredondamento é mais proeminente na face da broca, característico da geometria de trompette.

Para a ferramenta EP é possível verificar que o contorno gerado é um somatório de um

arredondamento quase que simétrico, mas com dois leves chanfros. Isto é característico do processo de escovamento, dado pela sua mecânica de remoção de material feita pelo filamento da escova ao entrar em contato com a superfície do gume, tende a remover mais do topo, gerando chanfros positivos arredondados (RODRÍGUEZ, 2009; OVERHOSLER *et al.*, 2003; DENKENA; BIERMANN, 2014).

### 5.3 PRÉ-TESTE

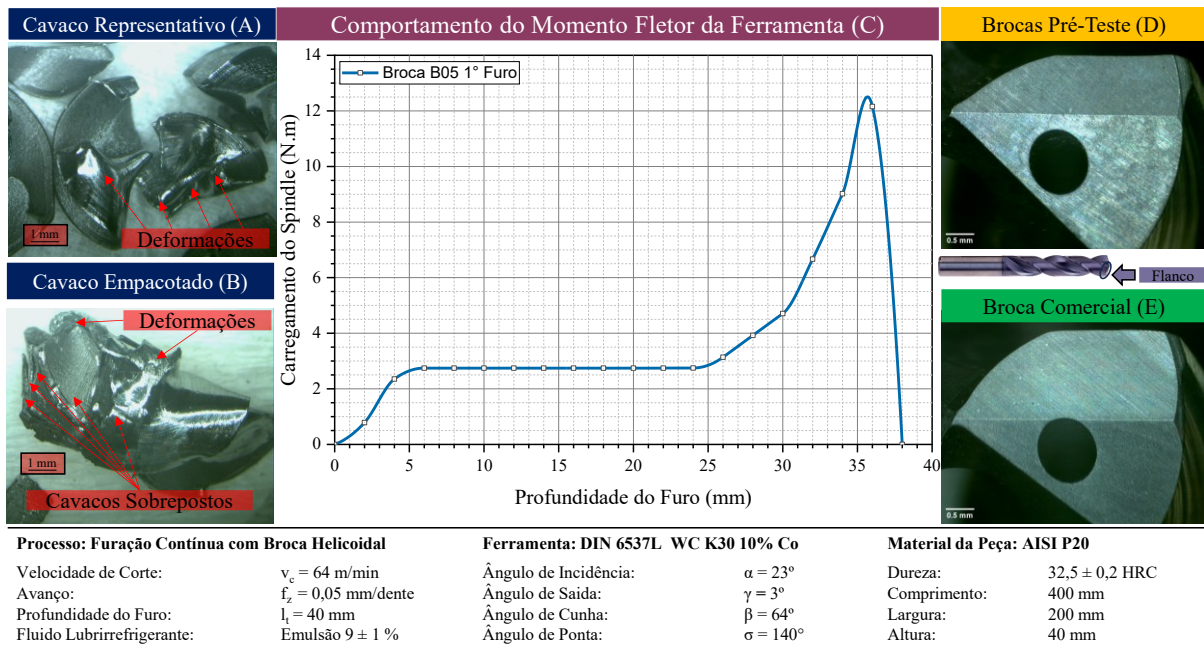
Esta etapa foi de suma importância para determinar as condições de usinagem utilizadas durante o processo. Para encontrar um parâmetro de corte adequado para os testes, inicialmente foram utilizadas seis ferramentas para o pré-teste. A ordem dos testes, numeração das ferramentas e os parâmetros de corte podem ser vistos na Tabela 6.

Codificação da Ferramenta	Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/dente)	Profundidade do Furo (mm)	Estado Final
Dormer #PRÉ-TESTE.UCS.01	150	0,05	40	Quebra 1º Furo (37 mm)
Dormer #PRÉ-TESTE.UCS.02	110	0,05	40	Quebra 1º Furo (37 mm)
Dormer #PRÉ-TESTE.UCS.03	100	0,05	40	Quebra 1º Furo (38 mm)
Dormer #PRÉ-TESTE.UCS.04	80	0,05	40	Quebra 1º Furo (36 mm)
Dormer #PRÉ-TESTE.UCS.05	64	0,05	40	Quebra 1º Furo (36 mm)
Dormer #PRÉ-TESTE.UCS.06	64	0,05	25,5	Desgaste de Flanco VB 0,2 mm – 1000 Furos

**Tabela 6.** Ferramentas do pré-teste (O autor, 2025).

O parâmetro de velocidade de corte foi o escolhido para ser variado, visto que o avanço da ferramenta foi fixado. Já a profundidade do furo, por ser passante, respeitou a relação de L/D da ferramenta e a espessura do CP. Durante a execução do primeiro furo foi identificado que as cinco primeiras brocas sofreram fraturas frágeis catastróficas na haste da ferramenta, na proximidade do final do furo. Diante das quebras, foi investigado alguns aspectos referentes ao processo de furação para a compreensão da quebra.

Questões externas a ferramenta de corte como o material do CP (microestrutura, dureza e inclusões), fluido de corte (concentração e pressão), fixação máquina-ferramenta e a fixação do CP foram checados, nos quais nenhum destes apresentaram anormalidades que comprometessem o processo de furação. Por estes motivos, questões relacionadas com o processo e a ferramenta foram avaliados, visualizados na Figura 41.



**Figura 41.** Avaliações das questões relacionadas ao pré-teste (O autor, 2025).

O cavaco foi o primeiro destes itens analisados para as cinco ferramentas que apresentaram quebras. No item A é visualizado que no geral os cavacos apresentaram elevadas deformações, dado pelo seu formato retorcido e compactado, que desviou de um formato de cavaco típico para um processo de furação desta natureza. No estudo de Ke *et al.* (2005), a formação de cavaco no processo de furação com um material com características frágeis se dá na forma de espiral, e para que o processo ocorra de forma fluida o cavaco deve ser bem quebrado. Em contrapartida a esta afirmação, durante o processo de furação foi encontrado cavacos do tipo empacotado (B), que correspondem a vários cavacos sobrepostos e deformados. Este tipo de cavaco é característicos de um processo de furação no qual há dificuldade de escoamento de cavacos para fora da cavidade, afetados principalmente pela geometria da ferramenta e as condições do processo de furação (KE *et al.*, 2005; ZEILMANN *et al.*, 2012).

Em conjunto, o momento fletor do processo foi captado através dos dados do *spindle* da máquina CNC. Com estas informações foi possível gerar um gráfico de comportamento da curva do momento fletor da ferramenta versus a profundidade do furo (C). Nas cinco ferramentas, independente da velocidade de corte utilizada, o comportamento da curva se manteve o mesmo. O momento fletor se manteve estável em 2,75 N.m até os 25 mm de profundidade. A partir deste ponto, o aumento do momento se mostrou de forma crescente, similar a um comportamento exponencial, até o seu pico máximo de 12 N.m no momento exato da quebra, na faixa de profundidade de 36 a 38 mm. Este aumento é superior a 300% em uma profundidade de 10 mm.

Autores como Ertunc e Oysu (2004), Klocke (2018), Biermann *et al.* (2018) afirmam que o aumento dos esforços no processo de aumentam com a profundidade do furo, visto que a dificuldade de retirada do cavaco de dentro da cavidade se torna mais crítica para o processo. Além disto, por ser uma furação passante, a saída da ferramenta do furo também exerce um impacto sobre as forças, as aumentando, porém de intensidade próxima a linear e não tão abrupta.

Um fator chave é que as ferramentas destinadas ao pré-teste e o teste experimental foram fabricadas em um mesmo lote de fabricação (D), exclusivamente para o ensaio. Por este motivo, questões ligadas ao processo de fabricação como a granulação, posição e passagem dos rebolos geraram uma macrogeometria diferente da especificadas, ao serem comparadas com uma ferramenta padrão comercial (E), visto que este modelo de ferramenta está apto a produzir cavidades até 40 mm ( $L/D = 5$ ). Erros na geometria da ferramenta, em comparação com uma ferramenta de produção regular, podem afetar expressivamente a vida de uma ferramenta de corte. Por conta de o processo de furação possuir várias adversidades, estes desvios geométricos são mais críticos para o desempenho da ferramenta (KALDOR; LENZ, 1980; TÖNSHOFF *et al.*, 1994; KOEHLER, 2008).

Por este motivo, conclui-se que a macrogeometria das ferramentas do lote destinado ao ensaio influenciou diretamente na restrição no fluxo de cavacos para fora da superfície, ocasionando uma quebra catastrófica na haste devido ao trancamento da ferramenta. Como visto pelo gráfico do momento fletor, a ferramenta se manteve estável até os 26 mm. Por este motivo, foi selecionado a profundidade do furo de 25,5 mm, com o intuito de mitigar problemas relacionados a restrição do fluxo de cavaco. O parâmetro de velocidade de corte testado foi o de 64 m/min, nos quais foram obtido resultados satisfatórios, sem quebras, lascamentos, portanto foi o parâmetro de corte selecionado para o teste.

## 5.4 DESGASTE DAS FERRAMENTAS

Nesta seção foi apresentado sobre o estado das brocas após o ensaio de usinagem, partindo da compreensão do comportamento de desgaste, identificação dos tipos e mecanismos de desgaste, e por fim, a vida destas brocas.

### 5.4.1 Comportamento

Após a definição das condições de do processo de usinagem, foi performedo os testes

experimentais para as duas condições distintas. O objetivo principal é verificar como as ferramentas se comportam ao longo do ensaio, observada pela Figura 42.

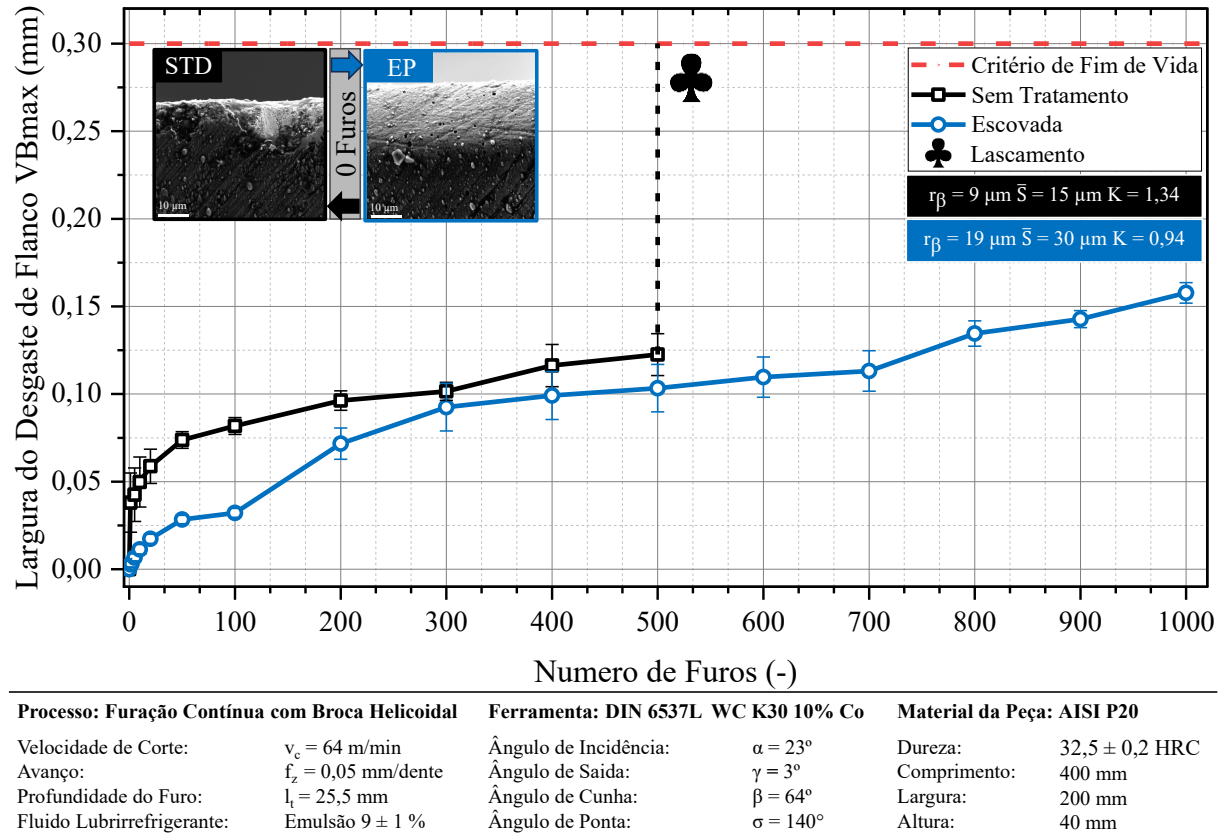


Figura 42. Comportamento de desgaste das brocas (O autor, 2025).

Nos primeiros furos, ambas as condições apresentaram um certo desgaste inicial, pelo fato do gume da ferramenta estar se adaptando as condições tribológicas do corte. É possível verificar que a broca STD experienciou um desgaste mais acentuado que a broca EP neste primeiro estágio do desgaste. A menor resistência mecânica do gume de corte dado por  $r_\beta = 9 \mu\text{m}$  e os defeitos microgeométricos foram os principais fatores.

O desgaste foi mais brando para a brocas EP no primeiros furos. Por possuir um raio  $r_\beta = 19 \mu\text{m}$ , mais que o dobro que na broca STD, esta condição exibe um incremento na resistência mecânica, que foi resultado do processo de escovamento. Apesar dos esforços no gume de corte aumentarem pelo fenômeno do sulcamento, seu efeito não afetou negativamente a estabilidade do gume, que suportou as solicitações impostas.

Até o 100º furo, a diferença entre o desgaste de flanco da broca STD para a EP chegava no seu valor máximo. A partir deste furo, o desgaste da condição sem tratamento entrou no estágio de estabilização do desgaste de flanco, no qual se manteve constante até o quinquagésimo furo. Porém, no decorrer do ensaio de furação, foi observado um outro tipo de

desgaste na broca STD, que se formou a partir do 100° furo, caracterizado como lascamento. Ele ocorreu em diferentes seções do gume principal, que atingiram a dimensão estipulada  $P_t \geq 0,3$  mm no quinquagésimo furo, portanto, decretou o final de vida da ferramenta.

Já broca EP, por sua vez, resultou numa curva que tendia para a estabilidade, mas foi notado um leve incremento no desgaste de flanco a partir do 100° furo, e partir do 300° furo, retornou a estabilidade. Por não atingir o critério de final de vida  $VB_{MAX} = 0,3$  mm, o teste foi conduzido até chegar ao critério de final de teste, estipulado em 1000 furos. Neste ponto, o desgaste de flanco foi de  $VB_{MAX} \approx 0,16$  mm, portanto, esta condição não experienciou o terceiro estágio de desgaste.

Ventura *et al.* (2015) performaram um ensaio utilizando insertos com tratamento de gume em diferentes condições de fator de forma K no torneamento duro, e verificaram uma redução do desgaste de flanco, visto que este processo é considerado de alta severidade. Da mesma forma, Basset *et al.* (2012) analisaram diferentes condições de tamanhos de arredondamento  $\bar{S}$  e do fator de forma K em insertos de metal-duro na usinagem de AISI 1045 e em seus resultados este dois fatores são determinantes para a vida da ferramenta, a partir de processo de escovamento. Arredondamentos muito grandes e fatores de forma  $K < 1$  resultaram nos piores desempenhos da ferramenta de corte. Além disto, o inserto sem tratamento de gume apresentou lascamentos que decretaram o seu final de vida, que indica a relação do raio pequeno com a incidência de lascamentos. Wang *et al.* (2020) também verificaram uma melhora no comportamento de desgaste de insertos com diferentes tratamentos, e o seu comportamento de desgaste foi controlado em comparação a ferramenta sem tratamento.

Com base nisto, é possível afirmar que o fator de forma K não teve grande significância no comportamento de desgaste da ferramenta, por conta da diferença no tamanho do raio e da condição da microtopografia do gume serem fatores mais influentes.

Trabalhos como o de Ost (2016), Carvalho (2021), Denkena *et al.* (2009), Krebs *et al.* (2018), Denkena *et al.* (2014), Denkena *et al.* (2021) e Hronek *et al.* (2018) compreenderam o efeito do tratamento de gume em fresas de metal-duro. No geral, os resultados mostraram uma redução do desgaste de flanco, bem como um controle adequado dos mecanismos de desgaste. O comportamento de desgaste se mostrou controlado, ao comparado com ferramentas sem tratamento de gume. Bouzakis *et al.* (2014) por outro lado, verificou que o comportamento de desgaste das ferramentas dependeu diretamente do tipo do material usinado. Em materiais de maior dureza e difícil usinabilidade, as ferramenta tratadas desempenharam melhor que as ferramentas sem tratamento. Porém ocorreu o inverso com materiais de menor dureza.

Já para Biermann *et al.* (2012) ao fazer a preparação do gume único de brocas canhão, também obteve uma redução no desgaste de brocas canhão após serem tratadas pelo processo de jateamento úmido. O comportamento destas brocas se manteve mais controlado para estas ferramentas. Santana (2015) também verificou o efeito da alteração da microgeometria em brocas de metal-duro na furação do aço SAE 4144M, e em seus testes utilizando o processo de escovamento notou-se uma redução do desgaste de flanco das ferramentas.

Além disto, é visto que o tratamento de gume, ao nivelar a superfície, permite uma melhor adesão do revestimento. Isto faz com que o a tribologia do corte seja melhorada, motivo dado a diminuição dos picos e vales presentes no substrato, que distribui os contatos de forma igual (TIKAL, 2009; PANJAN *et al.*, 2020; DENKENA *et al.*, 2014a).

Para verificar se o comportamento de desgaste seguiu um padrão e se os dados possuem correlação entre si, do ponto de vista estatístico, foi performado análises com este fim. O primeiro tipo de análise foi a partir da regressão linear dos valores de desgaste para cada intervalo de furação, nas duas condições de teste. Na Figura 43 é possível verificar as duas análises performadas. A correlação variada foi feita entre o número de furos e a largura do desgaste do flanco. A regressão seguiu um padrão linear, dado pela linha vermelha, com as bandas de regressão superior e inferior (pontilhado vermelho). O valor da correlação está dentro das especificações para as duas condições, no qual a condição EP possui a maior correlação.

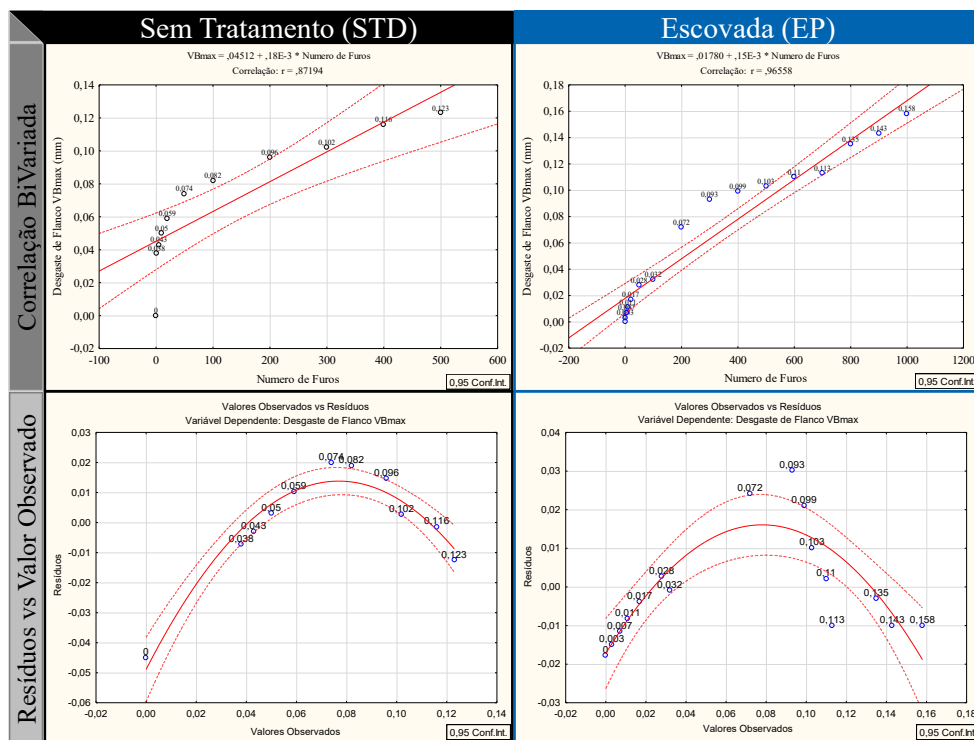


Figura 43. Correlação Bivariada e comparação do Resíduo para o comportamento de desgaste (O autor, 2025).

Já na análise dos valores observados para o desgaste do flanco em comparação com o resíduo, percebe-se que a maioria dos valores se encontram dentro das linhas de regressão polinomial de segunda ordem. Além disto, os valores do resíduo são considerados baixos, mesmo para os valores que extrapolaram as bandas de regressão.

Ainda, para verificar se as amostras possuem uma correlação entre si, foi realizado um teste estatístico de Durbin-Watson, como verificado na Figura 44.

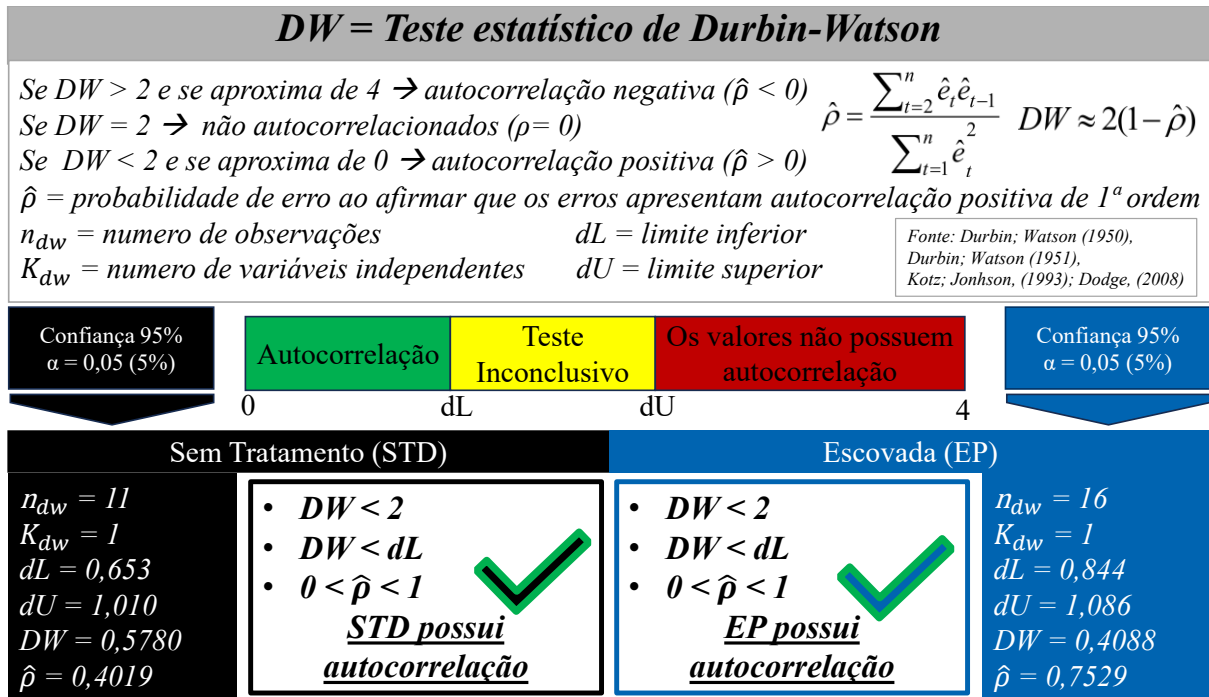


Figura 44. Teste estatístico de Durbin-Watson (O autor, 2025).

Da mesma forma que os testes anteriores, foi utilizada uma confiança de 95% para este teste. É possível verificar que nas duas condições de microgeometria, o valor do teste DW foi menor que dois, e resultou em um valor inferior que o limite inferior (dL). Portanto, é possível afirmar que os valores de desgaste possuem correlação entre si. Assim, nestas análises distintas, para 95% de confiança, pode-se garantir que os valores obtidos seguem um padrão e que não há valores considerados anormais para este comportamento de desgaste.

### 5.4.2 Mecanismos e Tipos

As duas condições de microgeometria foram submetidas a análises através do estereoscópio, MEV e EDS para verificar os mecanismos e tipos de desgaste presentes. Na Figura 45 se vê o desgaste de flanco das brocas, para determinados números de furos.

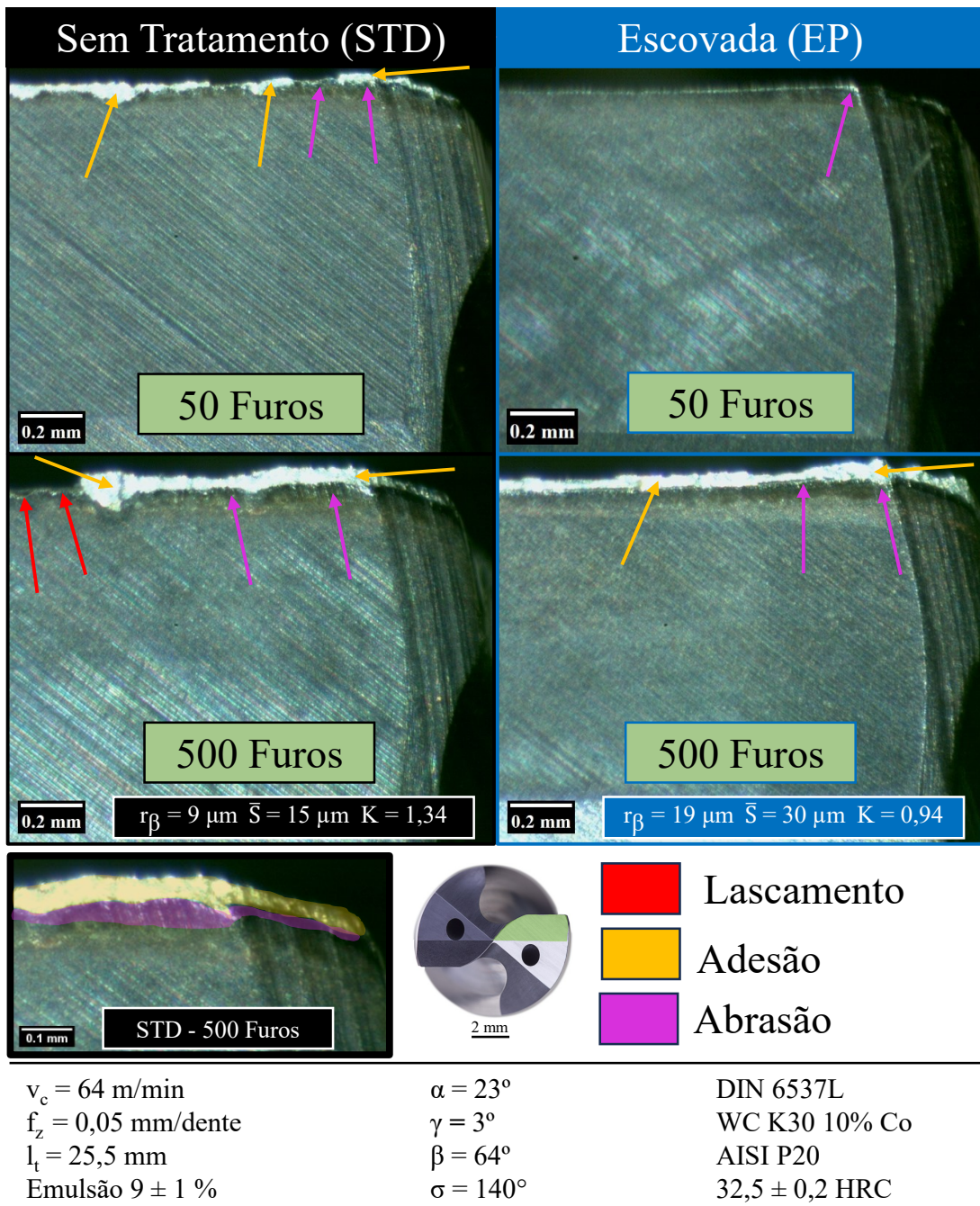


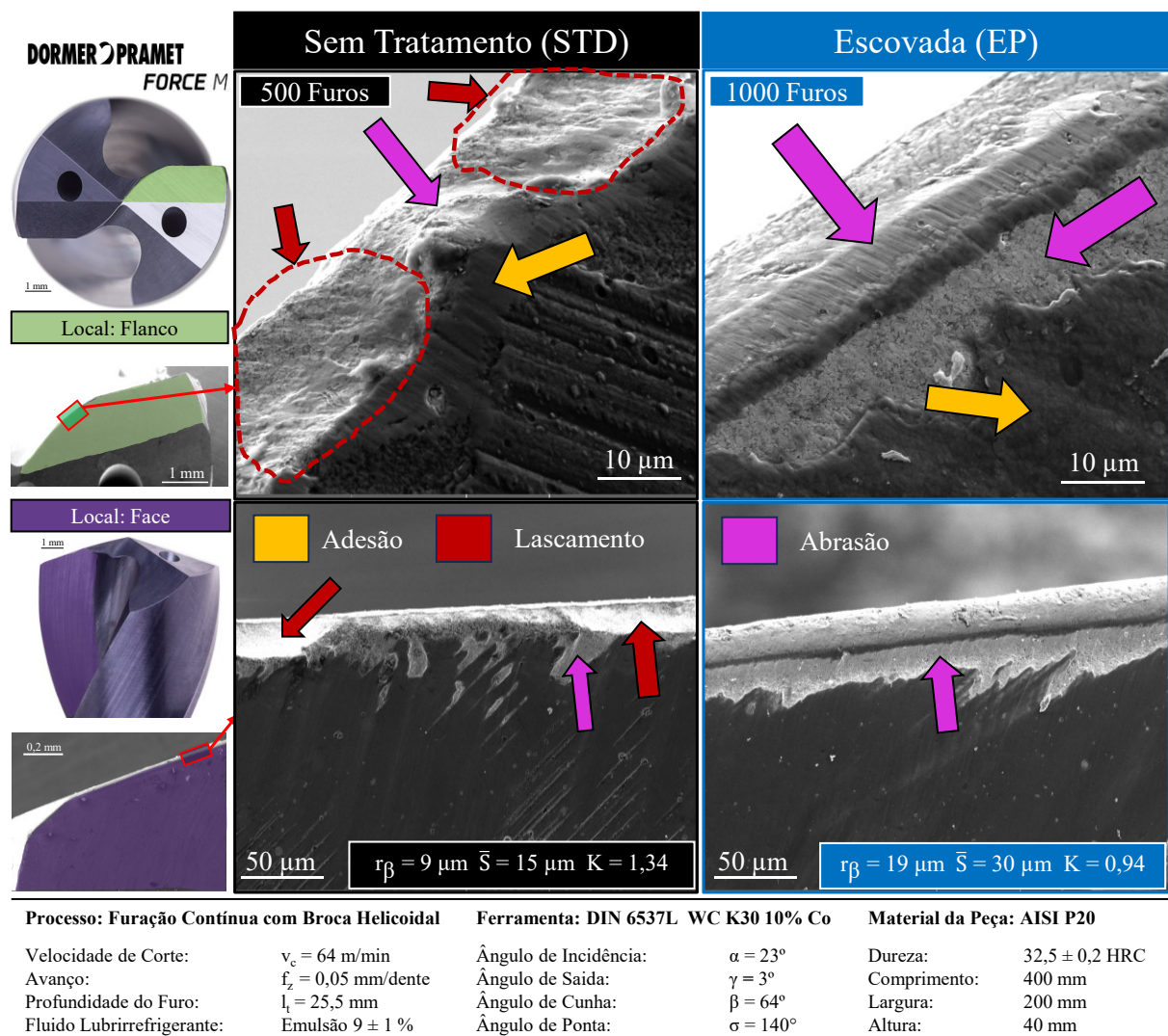
Figura 45. Progressão do desgaste de flanco das brocas (O autor, 2025).

Com 50 furos, se vê que a broca STD já apresentava uma faixa mais larga de abrasão se comparada com a EP, que possuiu pouca abrasão neste estágio. Ainda é possível verificar que no gume da condição sem tratamento já havia a presença de adesão. Em alguns locais pontuais foram notados microlascamentos na broca STD.

Já com 500 furos, o desgaste do flanco está mais pronunciado em ambas as ferramentas. Na broca escovada, nota-se uma faixa de adesão que segue ao longo do gume. Além disto, marcas de abrasão também são vistas. Na condição STD os mesmos mecanismos

de desgaste estão presentes. Porém, foram observados lascamentos de maiores dimensões ao longo do gume, e no caso de uma das ferramentas, o surgimento de um entalhe na extremidade do gume. Autores como Santana (2015) também experienciou lascamentos no gume de brocas sem tratamento de gume, na furação de um aço de elevada dureza. Estes lascamentos não foram notados nas brocas escovadas, que comprova a eficácia do tratamento em remover defeitos microgeométricos que afetam o comportamento de desgaste e comprometem a vida da ferramenta. Nos ensaios performados por Serafin (2025), a progressão do desgaste de flanco também seguiu este mesmo padrão. Os mesmos mecanismos de desgaste também foram identificados, apesar de ter utilizado ferro fundido como substrato do corpo de prova.

Na Figura 46 se tem uma visão complementar dos tipos e mecanismos de desgaste, pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. A análise foi feita no final de vida, no caso da broca STD e no critério de final de testes para a broca EP.



**Figura 46.** MEV dos tipos e mecanismos de desgaste encontrados nas brocas (O autor, 2025).

Em ambas as condições de ferramenta, o tipo de desgaste principal foi o desgaste de flanco. Verificou-se desgaste na quina e na guia das brocas, sem indícios de lascamentos ou alguma anormalidade. No gume transversal, não houve desgaste. Na face da ferramenta não foi constatado desgaste de cratera KT, em decorrência da broca possuir revestimento de TiAlN, que mitiga a interação química do substrato da ferramenta com o material da peça, que causaria o desgaste de cratera na face da ferramenta. Além disto, foi notado uma pequena faixa de abrasão na face da broca, em decorrência do escoamento do cavaco para fora da região do corte.

É possível verificar com mais clareza os microlascamentos, vistos tanto da face quanto do flanco da ferramenta STD. Lascamentos desta natureza são primariamente gerados pelo arrancamento de material do substrato da ferramenta, por consequência de a seção do gume da ferramenta não suportar as solicitações a ele imposto, principalmente em um gume com defeitos na topografia e praticamente afiado. Apesar de alguns autores afirmarem que a ocorrência de lascamentos do gume esteja ligada a processos de usinagem em que o corte é interrompido, resultado dos esforços mecânicos e térmicos cíclicos, isto também ocorre em processos que a combinação das propriedades mecânicas do material, condições do corte e a microgeometria da ferramenta superam esta resistência mecânica do gume. Além disto, por conta da velocidade de corte utilizada nos ensaios, do tempo e condições de contato, favorecem a existência do fenômeno do gume postiço. Esta combinação de fatores auxiliaram na geração de lascamentos (DENKENA *et al.*, 2012a; RODRÍGUEZ, 2009; KLOCKE, 2018).

Em nenhum ponto do gume da broca EP foi averiguado microlascamentos. Atribui-se este resultado por conta do incremento de resistência mecânica do gume pelo nivelamento da sua geometria, através da remoção de material. Nos trabalhos Denkena *et al.* (2012b), Basset *et al.* (2012), Denkena *et al.* (2010) foi verificado que o processo de escovamento auxiliou no controle dos mecanismos de desgaste. Biermann e Terwey (2008) verificaram que brocas sem tratamento de gume e com raio pequeno apresentaram um desgaste mais expressivo e com lascamentos na extremidade do gume principal. Por outro lado, houve uma redução no desgaste de flanco da broca tratada, com um raio aumentado.

Alguns autores correlacionam os microlascamentos presentes no gume com a propensão de gerar subseqüentes lascamentos de maiores dimensão durante o processo de usinagem, e reduzir a vida da ferramenta de corte. Biermann *et al.* (2012) verificou em brocas canhão que o tratamento de gume por jateamento úmido resultou na diminuição da rugosidade do gume, que auxiliou no nivelamento da superfície, e melhorou o desempenho da ferramenta. Por outro lado, Denkena *et al.* (2014) constatou que o processo de escovamento com filamentos

de SiC gerou microlascamentos de maior tamanho do que o inserto retificado. Em seus testes, o desempenho da ferramenta escovada foi pior que a ferramenta padrão.

Além da análise visual, foi performada uma análise de EDS na região do gume de corte, no flanco da ferramenta, como visto na Figura 47. O seu objetivo foi quantificar de fato os elementos químicos presentes no ponto de análise, para relacionar com o mecanismo de desgaste decorrente.

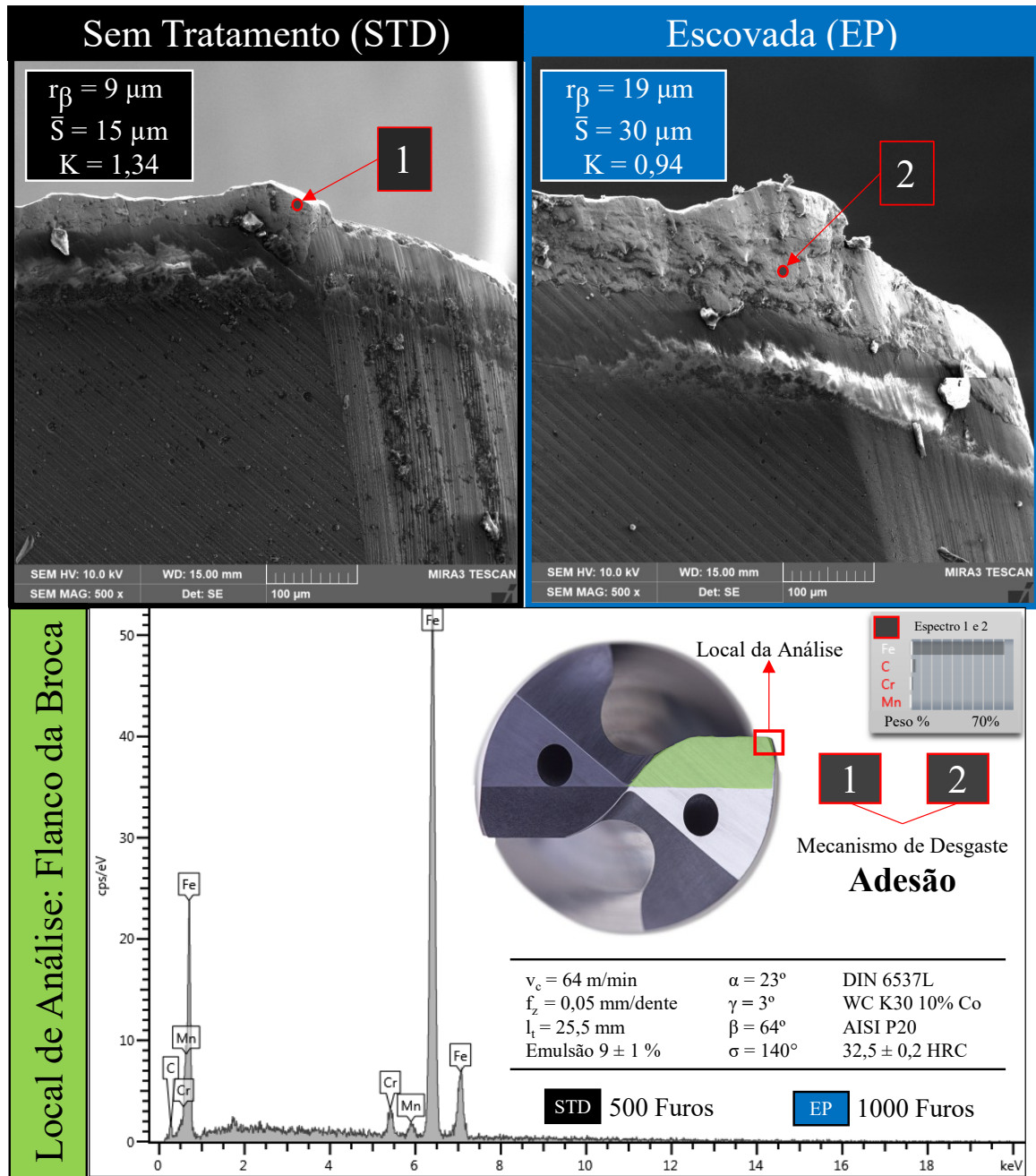


Figura 47. MEV/EDS do flanco/quina das brocas (O autor, 2025).

Da mesma forma que analisada pelas imagens óticas, também foi possível identificar

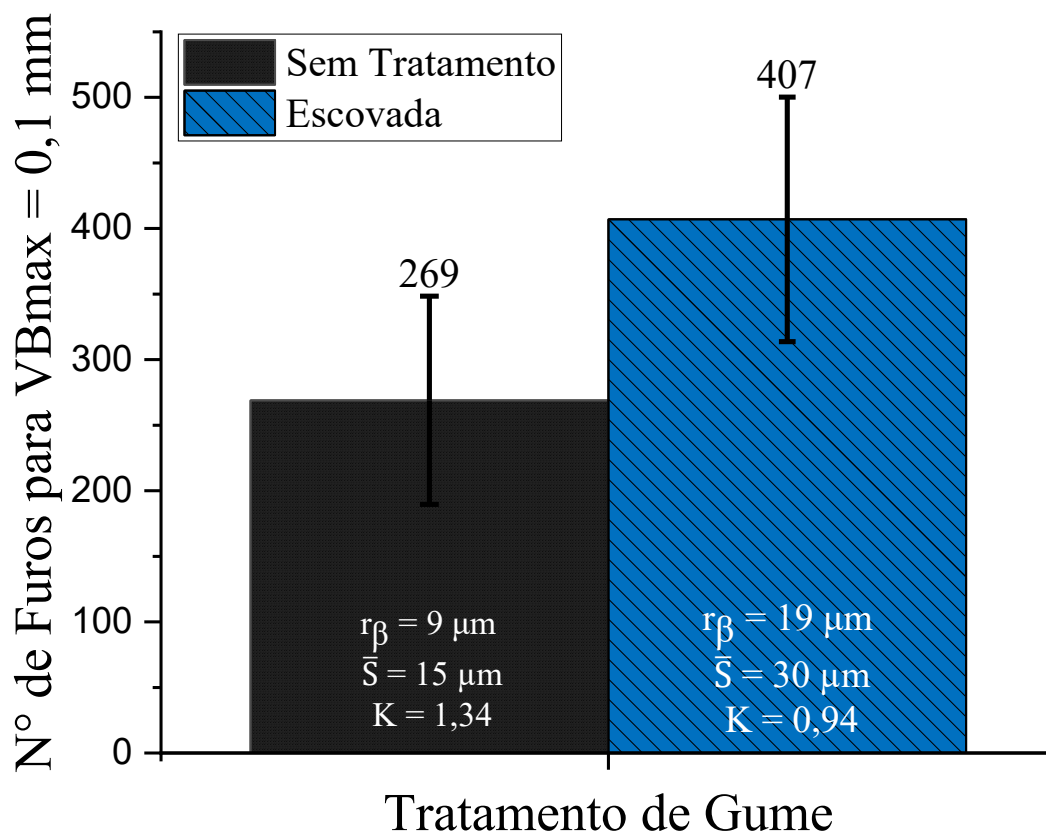
o mecanismo de abrasão nas duas condições, entre o limiar da camada aderida e do revestimento da ferramenta. No ponto de análise do espectro de elementos químicos, os que estão presentes são o ferro, carbono, cromo e manganês, que correspondem aos constituintes do material da peça AISI P20. Portanto, é possível afirmar que em ambas as condições das brocas há a presença de adesão. Na extremidade do gume, nota-se a presença de material caldeado, com maior dimensão na broca escovada ao comparado com a STD. Isto decorre do seu arredondamento  $\bar{S}$  ser o dobro da condição STD, que aumenta o efeito de sulcamento de material no gume. Portanto, o gume da broca EP é propenso a aderir uma quantidade maior de material da peça. Nesta situação, de acordo com autores como Denkena *et al.* (2012a), Tikal (2009), Denkena e Biermann (2014) e Ventura *et al.* (2017) os esforços mecânicos e térmicos são mais elevados a medida que se incrementa o raio do gume. Porém pela sua propriedades mecânicas elevadas, se sobressaiu frente as solicitações.

Por fim, não houve a presença dos mecanismos de desgaste por difusão e oxidação. Além da temperatura do processo não ser elevada, a ferramenta é revestida. No estudo de Denkena *et al.* (2020), que pesquisou a influência do substrato combinado com o tamanho do arredondamento do gume, verificou que em uma ferramenta revestida com o mesmo revestimento de TiAlN, também não houve a presença dos mecanismos de desgaste por oxidação e difusão, mas somente os de abrasão e adesão.

### 5.4.3 Vida

A estimativa da vida de uma ferramenta de corte possui um papel importante dentro do contexto da usinagem, pois é possível determinar quantitativamente sua utilização dentro de um processo. Ela pode ser expressa de várias maneiras, que levam em consideração o processo de usinagem executado e o critério de avaliação.

No tópico sobre o comportamento de desgaste foi visto que a ferramenta sem tratamento não atingiu o critério de final de vida pelo desgaste de flanco, mas sim pelo fato dos lascamentos ou entalhes no gume serem superiores ao critério estabelecido. Deste modo, a comparação da vida entre as duas condições de microgeometria foram feitas em um patamar de desgaste no qual ambas as ferramentas exibiam somente o desgaste de flanco como o tipo de desgaste prioritário, que neste caso foi o  $VB_{MAX} = 0,1$  mm. A vida das brocas helicoidais para as duas condições de microgeometria da ferramenta, expressada em função dos números de furos é observada na Figura 48.



Processo: Furação Contínua com Broca Helicoidal		Ferramenta: DIN 6537L WC K30 10%Co		Material da Peça: AISI P20	
Velocidade de Corte:	$v_c = 64$ m/min	Ângulo de Incidência:	$\alpha = 23^\circ$	Dureza:	$32,5 \pm 0,2$ HRC
Avanço:	$f_z = 0,05$ mm/dente	Ângulo de Saída:	$\gamma = 3^\circ$	Comprimento:	400 mm
Profundidade do Furo:	$l_t = 25,5$ mm	Ângulo de Cunha:	$\beta = 64^\circ$	Largura:	200 mm
Fluido Lubrificadorrefrigerante:	Emulsão $9 \pm 1$ %	Ângulo de Ponta:	$\sigma = 140^\circ$	Altura:	40 mm

**Figura 48.** Vida das Brocas para um  $VB_{MAX} = 0,1$  mm (O autor, 2025).

Por conta da condição da microgeometria STD apresentar defeitos e microlascamentos, a vida da ferramenta foi afetada negativamente, atingindo o patamar médio de 269 furos até atingir o desgaste de flanco  $VB_{MAX} = 0,1$  mm. Por outro lado, a broca EP se mostrou com um desempenho superior, alcançando o desgaste de flanco  $VB_{MAX} = 0,1$  mm com uma média de 407 furos. Isto corresponde a um aumento de 51,3% na vida da ferramenta até o desgaste de flanco estipulado. Nas duas condições, a dispersão dos valores se mostrou adequada para o processo.

Risse (2006) utilizou brocas de metal-duro com tratamento por arraste, e verificou que elas obtiveram um desempenho superior as que não possuíam tratamento. Além disso, Biermann e Terwey (2008) realizaram ensaios de furação de alta performance com brocas de metal-duro. A condição que foi tratada pelo jateamento úmido, com um maior arredondamento do gume, obteve êxito em reduzir o desgaste de flanco, visto que as condições do processo eram de elevada dificuldade.

Estes resultados estão em concordância com alguns autores. Wang *et al.* (2020a) em seu estudo comparando o efeito de diferentes tratamentos de gume em insertos de metal-duro verificou que a vida da ferramenta foi incrementada para todos os tratamentos. O processo de escovamento por sua vez resultou em um aumento de 77% no comprimento usinado para um mesmo desgaste de flanco de 0,1 mm.

Bouzakis *et al.* (2014) também verificou o impacto de diferentes tratamentos de gume em fresas de metal-duro em diferentes materiais. Dependendo da composição química e propriedades mecânicas do material testado a faixa no qual o raio do gume é o adequado será diferente. Por este motivo, em materiais com maiores durezas e elementos de liga, como o Ti6Al4V e Inconel 718, foram notados ganhos significativos na vida dessas ferramentas. Porém, em materiais com menor dureza, um raio pequeno, derivativo do processo de fabricação, se sobressaiu frente as ferramentas tratadas.

Caso a vida da ferramenta fosse verificada até atingir um dos critérios estabelecidos para o teste experimental, o aumento da vida da broca EP chegaria aos 100%, pois a condição STD somente atingiu 500 furos pelo critério de final de vida enquanto a condição EP chegou no limite do critério de final de teste com 1000 furos.

Além disto, caso não fosse considerado o critério de final de teste, mas somente o critério de final de vida  $VB_{MAX} = 0,3$  mm, por meio de uma extrapolação da curva de comportamento de desgaste, com a aplicação de uma regressão polinomial de terceira ordem, foi estimado que a vida da broca EP ultrapassaria os 170% de aumento, com valor final de 1395 furos até atingir o desgaste de flanco máximo  $VB_{MAX} = 0,3$  mm.

Portanto, por meio destas análises, foi fundamentado o potencial de utilização de uma ferramenta tratada pelo método de escovamento com polimento em comparação a uma ferramenta sem tratamento. Diversos aspectos como a qualidade superficial do gume, condição da microgeometria foram aperfeiçoados, que impactaram positivamente no comportamento de desgaste e vida desta broca. No final, o resultado desejado foi obtido, visto que o processo de escovamento deixou a ferramenta mais confiável e previsível, além reduzir tempos de processos e custo com ferramental.

## 6 CONCLUSÃO

O tratamento de gume é um processo subsequente a fabricação da ferramenta de corte, que tem a premissa de melhorar o seu desempenho, e diversos fatores influenciam na sua efetividade. Por conseguinte, neste trabalho foi visto o impacto causado pelo processo de escovamento com polimento no desempenho de brocas helicoidais de metal-duro.

Sobre a macrogeometria das brocas, não foi notado nenhuma alteração proveniente do tratamento de gume na ferramenta. Ambas as condições mantiveram as mesmas características dimensionais, de acordo com o padrão de afiação especificado pelo fabricante.

A ferramenta sem tratamento de gume, por possuir defeitos no gume e marcas provenientes do processo de retificação, resultou em uma microgeometria não uniforme ao longo da seção avaliada. O desvio padrão a respeito do raio  $r_\beta$ , das características do arredondamento  $S_\gamma$  e  $S_\alpha$  e do fator K foram elevados, não conformes para garantir uma confiabilidade do processo. A mesogeometria correspondeu a um contorno em forma de trompete.

O processo por escovamento com polimento foi capaz de remover material do gume, ou seja, obteve êxito em gerar um maior arredondamento. Os defeitos prévios que estavam presentes como marcas de retificação, microlascamentos e irregularidades foram em sua maioria extinguidos. Assim, isto resultou em uma melhoria na qualidade superficial do gume, que garantiu a sua homogeneidade ao longo do gume principal. Os parâmetros de caracterização do gume corroboram para a análise visual, que resultou em menores dispersões para os parâmetros  $S_\gamma$  e  $S_\alpha$ , raio do gume  $r_\beta$  e fator K. A mesogeometria deferiu de um contorno perfeitamente arredondado, mas se deu com dois leves chanfros, atribuído a mecânica de remoção da escova, que tende a nivelar o topo do gume, resultando em tal contorno.

Por sua vez, desgaste das brocas se deu em maiores proporções para a condição STD. O raio pequeno e os defeitos na superfície do gume prejudicaram o comportamento de desgaste. Além do desgaste de flanco, a ferramenta experenciou lascamentos que decretaram seu final de vida. Já a broca escovada manteve um comportamento de desgaste regular ao longo do teste, não atingindo o estágio crítico do desgaste, que a levaria a falha catastrófica.

Os testes estatísticos do desgaste de flanco para as duas condições de ferramentas, efetuados a partir de duas diferentes abordagens, convergiram para um comportamento que está dentro da normalidade, sem valores fora de séries, autocorrelacionando entre si.

Em ambas as condições se notou que os mecanismos de desgaste presentes foram a

abrasão e a adesão. Além disto, o desgaste de flanco foi o principal tipo de desgaste, porém somente na condição STD foram observados lascamentos.

A vida da broca EP foi 51% maior que a STD, para um mesmo desgaste de flanco de 0,1 mm. Porém, caso o número máximos de 1000 furos não fosse um limitante, foi estimado que a vida da broca EP ultrapassaria os 170%. Isto indicou que o tratamento resultou em um melhor controle dos mecanismos de desgastes por parte desta condição.

Por fim, é possível afirmar que o escovamento com polimento é uma técnica confiável para tratar a microgeometria de brocas helicoidais de metal duro e conseqüentemente melhorar a sua performance, mesmo que esta broca seja aplicada em um material da peça que a norma ISO 513 não indica o seu uso.

## REFERÊNCIAS

- ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P.; WRIGHT, Wendelin J. **The Science and Engineering of Materials**. 6. ed. Stanford: Cengage Learning, p. 949, 2011.
- ASM Metals Handbook. **Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys**, v. 1, ASM International, 1990.
- ASM Metals Handbook: **Metallography and Microstructures**, v. 9, 2ed. ASM International, 1992.
- ASTAKHOV, Viktor P. **Geometry of Single-point Turning Tools and Drills: Fundamentals and Practical Applications**. Cardiff: Springer London, p. 584, 2010-. ISSN 1098-6596.
- BARBOSA, Marcos Guilherme Carvalho Bráulio. **Influência da preparação de aresta e do avanço na usinagem do aço VP20TS**. 2021. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2021.
- 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**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 108–126, 2012.
- BEBLEIN, S.; KRÖDEL, A. Schartigkeit von fräsern. **VDI-Z Integrierte Produktion**, [s. l.], v. 161, n. 9, p. 71–77, 2019.
- BERGMANN, B. *et al.* Chip Formation of Rounded Cutting Edges. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 37–44, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00020-4>.
- 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**, [s. l.], v. 93, n. March, p. 873–878, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.028>.
- BIERMANN, D.; WEINERT, K.; TERWEY, I. Wie der Strahl die Schneidkante formt – Strahlspanen zur Schneidkantenpräparation von Vollhartmetallfräswerkzeugen. **Werkstatt + Betrieb**, [s. l.], v. 140, n. 12, p. 30–34, 2007.
- BIERMANN, D.; TERWEY, I. Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 76–80, 2008.
- BIERMANN, D.; WOLF, M.; AßMUTH, R. Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 172–177, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.030>
- BIERMANN, D.; KIRSCHNER, M. Experimental investigations on single-lip deep hole drilling of superalloy Inconel 718 with small diameters. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 20, p. 332–339, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.001>.

BIERMANN, D. *et al.* Wet Abrasive Jet Machining to Prepare and Design the Cutting Edge Micro Shape. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 45, p. 195–198, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.071>.

BIERMANN, D. *et al.* Deep hole drilling. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 673–694, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.007>.

BIERMANN, D.; KIPP, M.; BATHE, T. Bedarfsgerechte Werkzeugpräparation Durch Polierschleifen Und Schneidkantenpräparation. **Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 52–55, 2021.

BRINKSMEIERS, E. Prediction of Tool Fracture in Drilling. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 97–100, 1990.

BORDIN, Fernando Moreira. **Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos**. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2013.

BORDIN, F. M.; ZEILMANN, R. P. Effect of the cutting edge preparation on the surface integrity after dry drilling. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 13, p. 103–107, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.018>.

BOUZAKIS, K. D. *et al.* Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 264–273, 2014.

BOUZAKIS, K. D. *et al.* Effect of HM substrates' cutting edge roundness manufactured by laser machining and micro-blasting on the coated tools' cutting performance. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. 18, p. 188–197, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.02.003>.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKINA, B. Advancing Cutting Technology. **CIRP Annals**, [s. l.] v. 52, n. 2, p. 483–507, 2003. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/7hd8r1ft>

CALLISTER JR.; W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC, 10. ed. 2006.

CHATTI, S. *et al.* **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**. 2 ed. Berlin. Springer-Verlag, p. 1832, 2019. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4>.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais, Tratamentos Térmicos, Principais Tipos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2012.

CHILDS, T. *et al.* **Metal Machining: Theory and Applications**, London: John Wiley & Sons Inc. p. 408, 2000.

DAVIM, J. P. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. Aveiro: Springer Verlag, p. 361, 2008, ISBN 978-1-84800-212-8.

DAVIM, J. P. **Metal Cutting Technologies: Progress and Current Trends**, 1 ed. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, p. 171, 2016. <https://doi.org/10.1515/9783110451740>

DENKENA, B. *et al.* An der Schneide wird das Geld verdient - Neue Parameter zur Charakterisierung der Schneidengeometrien an Zerspanwerkzeugen. **Werkzeugtechnik+Verfahren**, v. 30, n. 12, p. 24-26, 2002.

DENKENA, B.; BECKER, J. C.; DE LEON-GARCIA, L. Study of the influence of the cutting edge microgeometry on the cutting forces and wear behavior in turning operations. **Proceedings of the 8th CIRP, International Workshop on Modelling of Machining Operations**, Chemnitz, Germany, p. 503-507, 2005.

DENKENA, B. *et al.* Methoden zur Präparation von Zerspanwerkzeugen - Leistungsoptimierung an der Schneidkante. **VDI-Z Special Werkzeuge**, Hannover, v. 8, p. 24-26, 2007

DENKENA, B.; DE LEON, L.; KHLER, J. Cutting edge preparation for cemented carbide milling tools. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 76-78, p. 597-602, 2009a.

DENKENA, B.; DE LEON, L.; REHE, M. Prozesssicher verrunden - Bürstkinematik und Borstenverschleiß bei der Schneidkantenpräparation. **Werkstatt und Betrieb**, [s. l.], v. 10, p. 36-39, 2009b.

DENKENA, B. *et al.* Cutting edge preparation by means of abrasive brushing. **Key Engineering Materials**, [s. l.], v. 438, p. 1-7, 2010.

DENKENA, B.; LUCAS, A.; BASSETT, E. Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 73-76, 2011.

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; MENGESHA, M. S. Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process: Part 1. Investigation of material flow, process forces, and cutting temperature. **Production Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 4-5, p. 329-338, 2012a.

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; REHE, M. Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 190-195, 2012b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.033>.

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. Customized cutting edge preparation by means of grinding. **Precision Engineering**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 590-598, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.01.004>.

DENKENA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 63, n. 2, p. 631-653, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>.

DENKENA, B. *et al.* Influence of the cutting edge preparation method on characteristics and performance of PVD coated carbide inserts in hard turning. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], v. 254, p. 447-454, 2014a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.07.003>.

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; SCHINDLER, A. Behavior of the magnetic abrasive tool for cutting edge preparation of cemented carbide end mills. **Production Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 627–633, 2014b.

DENKENA, B.; KRÖDEL, A.; HEIN, M. Innovative method for cutting edge preparation with flexible diamond tools. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 86, n. March, p. 121–125, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.010>.

DENKENA, B. *et al.* Influence of tool material properties on the wear behavior of cemented carbide tools with rounded cutting edges. **Wear**, [s. l.], v. 456–457, n. July, p. 1–8, 2020.

DENKENA, B. *et al.* Influence of End Mill Manufacturing on Cutting Edge Quality and Wear Behavior. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, [s. l.], v. 77, n. 5, p. 1–16, 2021.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1412**: Spiralbohrer aus HSS—Anschliffformen. Berlin: Beuth Verlag, 2001.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 6535**: Zylinderschäfte aus Hartstoffen für Bearbeitungswerkzeuge – Maße. Berlin: Beuth Verlag, 2024.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 6537**: Vollhartmetall-Spiralbohrer mit abgesetztem Zylinderschaft – Maße. Berlin: Beuth Verlag, 2020.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 6582**: Begriffe der Zerspantechnik: Ergänzende Begriffe am Werkzeug, am Schneidkeil und an der Schneide. Berlin: Beuth Verlag, 1988.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 6583**: Begriffe der Zerspantechnik: Standbegriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1981.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8580**: Fertigungsverfahren—Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag, 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8589**: Fertigungsverfahren Spanen. Berlin: Beuth Verlag, 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8589-2**: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 2: Bohren, Senken, Reiben. Berlin: Beuth Verlag, 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 50320**: Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Berlin: Beuth Verlag, 1979.

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

DODGE, Y. **The Concise Encyclopedia of Statistics**. New York: Springer International Publishing, p. 616, 2008

DURBIN, J.; WATSON, G. S. Testing for serial correlation in least squares regression. I. **Biometrika**, [s. l.], v. 37, n. 3–4, p. 409–428, 1950.

DURBIN, J.; WATSON, G. S. Testing for serial correlation in least squares regression. II. **Biometrika**, [s. l.], v. 38, n. 1–2, p. 159–178, 1951.

ERTUNC, H. M.; OYSU, C. Drill wear monitoring using cutting force signals. **Mechatronics**, [s. l.], v. 14, n. 5, p. 533–548, 2004.

FERNANDES, C. M.; SENOS, A. M. R. Cemented carbide phase diagrams: A review. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 405–418, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.02.004>.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos de Usinagem dos Metais**. 11 ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher, p. 751, 2003.

FRANK, P.; OTTO, A. Flakkotieren von Fräsern zum Mikro-Hartfräsen - Optimierung des Einsatzverhaltens von Mikrotorusfräsern beim Hartfräsen durch Hochpräzisionsbürsten. **Wt Werkstattstechnik**, [s. l.], v. 109, n. 11–12, p. 833–839, 2019.

FRIEMUTH, Thomas. **Herstellung spanender Werkzeuge**. Düsseldorf: VDI-Verlag, p. 184, 2002.

FONTANIVE, F.; ZEILMANN, R. P.; SCHENKEL, J. D. Surface quality evaluation after milling Inconel 718 with cutting edge preparation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 104, n. 1–4, p. 1087–1098, 2019.

GARCÍA, J. *et al.* Cemented carbide microstructures: a review. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, [s. l.], v. 80, n. December 2018, p. 40–68, 2019.

HARTIG, Jörg. **Einsatz elastisch gebundener Schleifscheiben bei der Schneidkantenpräparation von Hartmetall-Wendeschnidplatten**. 2024. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau. Kaiserslautern, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.26204/KLUEDO/8518>

HASSELDER, D; UHLMANN, E. Detektion von Schneidkanten- versatz und Rautiefe. **Wt Werkstattstechnik**, [s. l.], v. 111, n. 11–12, p. 803–806, 2021.

HECKMANN, L. **Systematische Analyse der Schneidkantenarchitektur mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode**. Kassel: Kassel University, p. 164, 2010.

HRONEK, O. *et al.* Influences of cutting edge microgeometry on durability when milling ISO S material. **Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 394–399, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.21062/ujep/111.2018/a/1213-2489/MT/18/3/394>.

HU, Y. *et al.* Microscopic fringe projection profilometry: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, [s. l.], v. 135, n. July, p. 106192, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106192>.

HUANG, L. *et al.* The process of combined abrasive jet blasting for cutting-edge preparation of carbide cutting inserts. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 133, n. October 2023, p. 969–978, 2025a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.11.089>.

HUANG, Xiangming *et al.* Cutting edge Passivation of Cemented Carbide Milling Tool by Magnetic-Field Assisted Shear Thickening Polishing Technology. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, [s. l.], n. 0123456789, 2025b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12541-025-01277-8>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: **ISO 513**: Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application. Genebra, p. 9, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: **ISO 3685**: Tool life testing with single point turning tools. Genebra, p. 48, 1993.

IZOTOV, V. I. *et al.* Influence of the pearlite fineness on the mechanical properties, deformation behavior, and fracture characteristics of carbon steel. *Physics of Metals and Metallography*, [s. l.], v. 103, n. 5, p. 519–529, 2007.

JÄCKEL, C. P. *et al.* Cutting edge preparation of micro end mills by PVD-etching technology. **Production Engineering**, [s. l.], v. 18, n. 3–4, p. 459–473, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01257-9>.

KALDOR, S.; LENZ, E. Investigation in Tool Life of Twist Drills. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 23–27, 1980.

KANAI, M. *et al.* Statistical characteristics of drill wear and drill life for standardized performance tests. **Annals of the CIRP**, [s. l.], v. 27, p. 61–66, 1978.

KE, F.; NI, J.; STEPHENSON, D. A. Continuous chip formation in drilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 45, n. 15, p. 1652–1658, 2005.

KIPP, M.; BATHE, T.; BIERMANN, D. Bedarfsgerechte Werkzeugpräparation Durch Polierschleifen und Schneidkantenpräparation. **Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 52–55, 2021.

KLEIN, H. H. **Bohren und Aufbohren**: Verfahren, Betriebsmittel, Wirtschaftlichkeit, Arbeitszeitermittlung. 1. ed. Berlin: Springer Verlag, p. 140, 1975.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1**: Cutting. 1. ed. Aachen: Springer-Verlag, p. 504, 2011.

KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1**: Zerspanung mit geometrisch bestimmter schneide. 9. ed. Aachen: Springer-Verlag, p. 682, 2018.

KOEHLER, W. Analysis of the high performance drilling process: Influence of shape and profile of the cutting edge of twist drills. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, [s. l.], v. 130, n. 5, p. 0510011–0510017, 2008.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren Band 1**: Drehen, Fräsen, Bohren. 5. ed. Aachen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, p. 471, 1997.

KOTZ, S; JOHNSON, N. L. **Breakthroughs in Statistics Volume II** - Methodology and Distribution. New York: Springer-Verlag New York, p. 613, 1993.

KREBS, E. *et al.* High-quality cutting edge preparation of micromilling tools using wet abrasive jet machining process. **Production Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 45–51, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-017-0787-7>.

LI, J-Y; ZHANG, W-Y. Effect of TiN inclusion on fracture toughness in UHSS. **ISIJ International**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 158–164, 1989.

LI, X. Y. *et al.* Carbide twist drill surface polishing and cutting edge passivating based on magnetic field-assisted shear thickening. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 126, n. 11–12, p. 5649–5664, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11455-5>.

LIU, D. *et al.* Effect of cooling rates and compressive deformation of austenite on bainitic transformation and microstructure for plastic die AISI P20 steel. **ISIJ International**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 482–488, 1998.

LV, D. *et al.* Analysis of abrasives on cutting edge preparation by drag finishing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 119, n. 5–6, p. 3583–3594, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08623-w>.

MACHADO, A; ABRÃO, A; COELHO, R; SILVA, M. **Teoria de Usinagem dos Materiais**. 1. ed. Editora Blucher, p. 371, 2009.

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

MALEKAN, M.; ILVIG, C. F.; AGHABABAEI, R. Effects of Edge Radius and Coating Thickness on the Cutting Performance of AlCrN-Coated Tool. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, [s. l.], v. 25, n. 10, p. 2059–2075, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12541-024-01074-9>.

MEIJER, A. L. *et al.* Preparation of asymmetrical cutting edge geometries on micro end mills using pressurized wet abrasive jet machining for hard micromachining of AISI M3:2. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. 51, n. May, p. 252–262, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.05.005>.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 9. ed. Hoboken: Jonh Wiley & Sons, p. 724, 2017.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **ODS-Objetivos de desenvolvimento sustentável**. 2015. Acesso em: 04 de novembro de 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

NARDY, M. F. M. *et al.* Surface finish and edge preparation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO cutting inserts by grinding and their application in hard turning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 134, n. 1–2, p. 677–689, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14172-9>.

OST, Charles Antônio. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com diferentes tratamentos de ferramentas**. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2016.

OVERHOLSER, R. W.; STANGO, R. J.; FOURNELLE, R. A. Morphology of metal surface generated by nylon/abrasive filament brush. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 193–202, 2003.

PANJAN, P. *et al.* Review of growth defects in thin films prepared by PVD techniques. **Coatings**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 447–487, 2020. <https://doi.org/10.3390/coatings10050447>

PAUCKSCH, E. *et al.* **Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien**. 12ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, p. 458, 2008

PRIYADARSHINI, M. *et al.* Experimental Analysis and Mechanical Characterization of AISI P20 Tool Steel Through Heat-Treatment Process. **Journal of Bio- and Tribo-Corrosion**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1–10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00607-3>.

RECH, J. *et al.* Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts. **Wear**, [s. l.], v. 259, n. 7–12, p. 1168–1176, 2005.

RISSE, K. **Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl**. Aachen: Shaker Verlag, p. 137, 2006. ISBN: 978-3-8322-5252-6

RIU-PERDRIX, G. *et al.* Cemented Carbide End-Mill Edge Preparation Using Dry-Electropolishing. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, [s. l.], v. 8, n. 1, 2024.

RODRÍGUEZ, C. J. C. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing**. Kassel: Kassel University Press GmbH, p. 189, 2009.

SANTANA, M. I. **Influência da preparação das arestas de corte de brocas helicoidais no processo de furação**. 2015. 148 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Curitiba, 2015.

SCHMIER, M. **Randzonenveränderung beim Bohren und ihre Auswirkung auf folgebearbeitungsverfahren**. Tese de Doutorado, Kassel: Kassel University Press GmbH, p. 167, 2004.

SERAFIN, D. **Influência Do Tratamento Do Gume No Desgaste De Brocas Helicoidais De Metal-Duro Na Usinagem De Ferro Fundido Nodular**. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2025.

SOMMER, K.; HEINZ, R.; SCHÖFER, J. **Verschleiß metallischer Werkstoffe**. 3. ed. Germany: Springer, p. 613, 2018.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 6ed. Ed. da UFSC, p. 249, 2005a

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresas, Brochas, Rebolos, Abrasivos**. 3ed. Ed da UFSC, p. 314, 2005b

TIKAL, F. **Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden**: Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel: Kassel University Press GmbH, p. 193, 2009.

TÖNSHOFF, H. K.; DENKENA, B. **Basics of cutting and abrasive processes**: 1ed. Hannover, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 399, 2013.

TÖNSHOFF, H. K. *et al.* Machining of Holes Developments in Drilling Technology. **Annals of the CIRP**, [s. l.], v. 43, p. 551–561, 1994.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Boston: Butterworth–Heinemann, p. 464, 2000.

TSAI, W. D.; WU, S. M. Mathematical Model for Drill Point Design and Grinding. **ASME Pap**, [s. l.], v. 101, n. 78-WA/PROD-35, p. 333–340, 1978.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI/VDE 2654 Blatt 2**: Charakterisieren und Messen von Schneidkanten - Begriffe, Kenngrößen und Parameter. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2020.

VENTURA, C. E.H.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 19, p. 129–134, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.010>.

VENTURA, C. E. H. *et al.* The influence of the cutting tool microgeometry on the machinability of hardened AISI 4140 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 90, n. 9–12, p. 2557–2565, 2017.

VENTURA, C. E. H. *et al.* Performance evaluation of the edge preparation of tungsten carbide inserts applied to hard turning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 112, n. 11–12, p. 3515–3527, 2021.

VOPÁT, T. *et al.* Cutting edge microgeometry and preparation methods. **Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium**, [s. l.], p. 384–391, 2017.

VOPÁT, T. *et al.* Advanced approach of forming cutting edge radii on cemented carbide cutting tools using plasma discharges in electrolyte. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 120, n. April, p. 778–794, 2024.

VOZÁR, M. *et al.* Influence of drag finishing parameters on the cutting edge radius of solid carbide mills. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 749, n. 1, 2020.

WANG, X. *et al.* Effects of geometric structure of twist drill bits and cutting condition on tool life in drilling 42CrMo ultrahigh-strength steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 64, n. 1–4, p. 41–47, 2013.

WANG, W. *et al.* Effect of edge preparation technologies on cutting edge properties and tool performance. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 106, n. 5–6, p. 1823–1838, 2020a.

WANG, W. *et al.* Effects on tool performance of cutting edge prepared by pressurized air wet abrasive jet machining (PAWAJM). **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 277, n. October 2019, p. 116456, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116456>

WECKENMANN, A.; NALKNTIC, K. Precision Measurement of Cutting Tools with two Matched Optical 3D-Sensors. **CIRP Annals** [s. l.], v. 52 n. 1, p. 443-446, 2003.

WEGENER, K. *et al.* Success Story Cutting. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 46, p. 512–524, 2016.

WEINERT, K. **Trockenbearbeitung und Minimalmengenkuehlschmierung**: Einsatz in der spanenden Fertigungstechnik. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

WHITEHOUSE, D. **Surfaces and their measurement**. 1. ed. London : Kogan Page Science, 2002

WILLIAMS, R. A. A study of the drilling process. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 96, n. 4, p. 1207–1215, 1974.

WYEN, C. F.; KNAPP, W.; WEGENER, K. A new method for the characterization of rounded cutting edges. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 59, n. 9–12, p. 899–914, 2012.

YOUSSEF, H. A.; EL-HOFY, H. **Machining Technology**: Machine Tools and Operations. 1ed. CRC Press, p. 633, 2008

ZEILMANN, R. P. *et al.* Implications of the reduction of cutting fluid in drilling AISI P20 steel with carbide tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 5–8, p. 431–441, 2012.

ZEILMANN, R. P.; OST, C. A.; FONTANIVE, F. Characterization of edge preparation processes and the impact on surface integrity after milling of AISI P20 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [s. l.], v. 40, n. 9, p. 1–7, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1338-7>.

ZHOU, Y. *et al.* Edge preparation methods for cutting tools: a review. **Frontiers of Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 18, n. 4, 2023.

ZHOU, Y. *et al.* High Efficiency Preparation of Microdrill Edge by Shear Thickening Polishing. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 75–95, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40684-024-00634-8>.

ZHUANG, K. *et al.* Cutting edge microgeometries in metal cutting: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 116, n. 7–8, p. 2045–2092, 2021.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. Amsterdam: Elsevier Science, p. 559, 1987.

ZUM GAHR, K. H. **Reibung und Verschleiß**: Ursachen - Arten - Mechanismen. Oberursel: DGM Informationsgesellschaft, p. 308, 1992.

## ANEXO A - EQUIPAMENTOS



Figura 49. Equipamentos de caracterização (O autor, 2025).

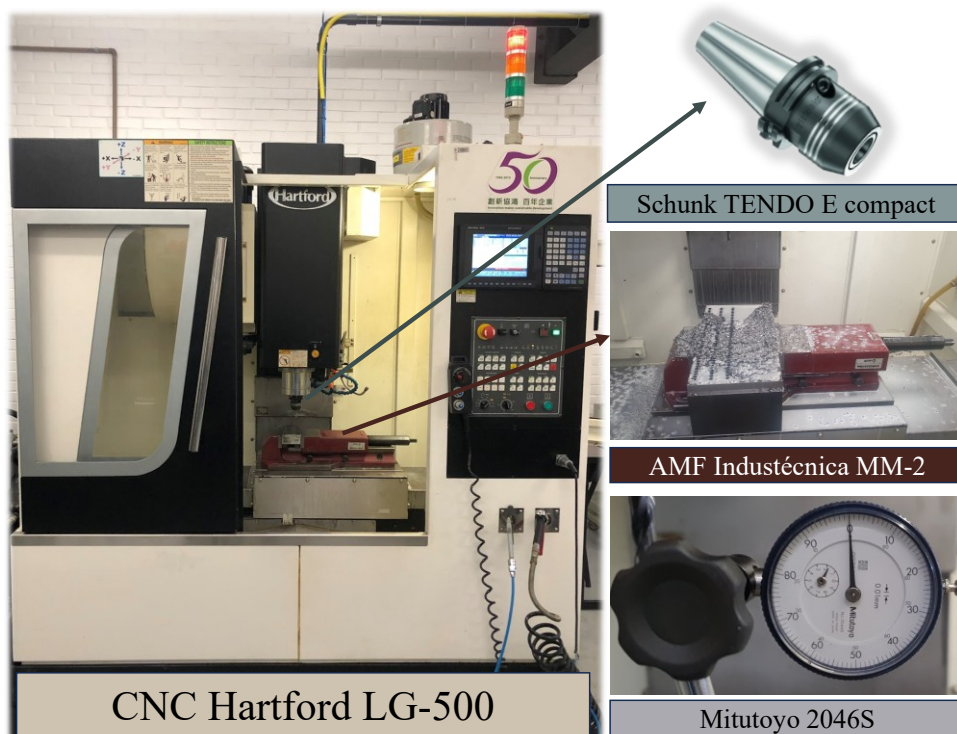


Figura 50. Equipamentos máquina-ferramenta (O autor, 2025).

## ANEXO B – ENSAIOS MECÂNICOS

### UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos

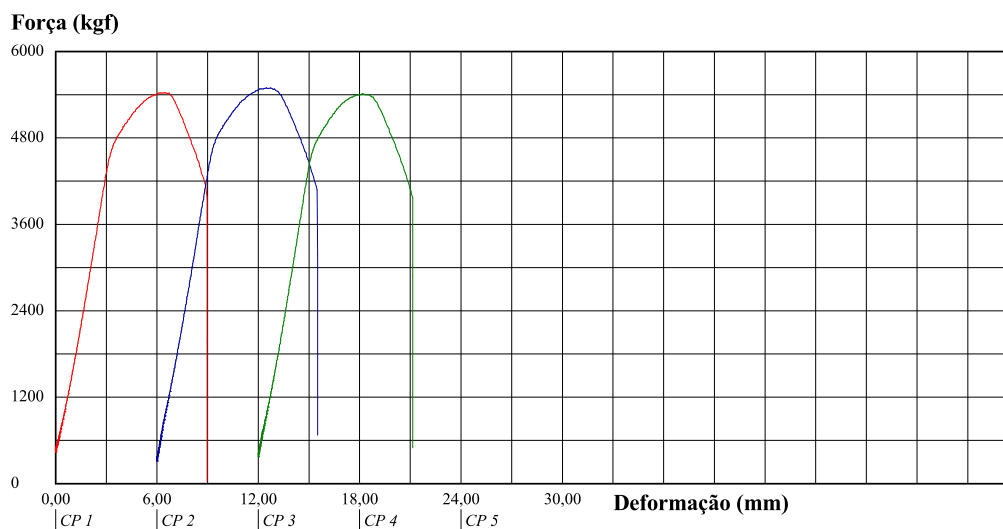
REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 01 (DEZ/2016)

#### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 12** Extensômetro: - Data: **05/02/2025** Hora: **14:29:44** Trabalho n° **1248**  
 Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **20T\_TRAÇÃO CILINDRICO**  
 Ident. Amostra: > Cliente: **8228** Temp.(°C): **22,6** - Ident. n°: **A-01.1, A-01.2, A-01.3.** S.S.: **00075/25** - Folha: **02 de 02**

Corpo de Prova	Identif nº:	Diâmetro (mm)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Força *Escoam. (kgf)	Força Maxima (kgf)	Comp. Inicial (Lo) (mm)	Comp. Final (Lf) (Medido) (mm)	Estricção Medida (mm)
CP 1	A-01.1	8,03	8	4614	5439	40	44,64	5,90
CP 2	A-01.2	8,08	8	4667	5501	40	45,47	5,81
CP 3	A-01.3	8,06	8	4602	5420	40	45,44	5,94

\*Escoam. - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: 0,2%: **0**  
 Método de ensaio segundo norma : **0**  
 Paquímetro utilizado P( ): **6**  
 Along. Virtual CP : **0**  
 Segmento X Y: **0,00**  
 Segmento Y Z: **0,00**  
 Segmento Y Z': **0,00**  
 Segmento Y Z'': **0,00**



**Observação:**

**IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE:** 01 Amostra de placa de aço P20 para confecção de 03 corpos de prova para ensaio de TRAÇÃO. Identificação: A-01.1, A-01.2, A-01.3.

**Figura 51.** Ensaio de tração do CP de AISI P20 (O autor, 2025).



# Relatório de Ensaio

LAMEC – FG 203 Rev 07  
Laboratório de Ensaios Mecânicos de Caxias do Sul

Cliente: CPOS - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias - CC 3.51.02.51.58.03

Endereço:

Contato: Luccas Augusto Pedrassani Delgado

Data: 06/02/2025

Natureza do Trabalho: **Ensaio de Impacto Charpy**

## 1. Identificação da amostra

01 Amostra de placa de aço P20 para confecção de 03 corpos de prova para ensaio de IMPACTO. Identificação: A-01.1, A-01.2, A-01.3.

**Data do Recebimento:** 17/01/2025

## 2. Metodologias utilizadas

- Ensaio realizado conforme procedimento LAMEC PE 005 rev 08, em atendimento às normas ASTM E23:2018.

- A incerteza expandida de medição relatada "U" é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos [Veff] corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 [1999].

## 3. Resultados Ensaio de Impacto Charpy

- **Data de execução:** 06/02/25

- **Energia máxima do pêndulo utilizado:** 294 Joules.

- **Perda por atrito avaliado:** 0,76 Joules.

- **Raio do cutelo:** 8 mm.

- **Entalhe tipo:** V

- **Temperatura de ensaio:** 22 °C - (Ambiente)

- **Temperatura ambiente:** 22 °C

Identificação nº	Área (cm <sup>2</sup> )	Energia Absorvida (J)	Resistência ao Impacto (J/cm <sup>2</sup> )
A-01.1	0,806	14,2	18
A-01.2	0,807	14,7	18
A-01.3	0,802	7,8	10
-	-	-	-
-	-	-	-

- Os valores de incerteza de medição máxima relacionadas as medidas apresentadas acima, foram de **U= ± 0,6%**

**Observação:** Gravidade local = 9,79017 m/s<sup>2</sup>

## 4. Equipamentos Utilizados

- Máquina de impacto, marca: Webstoffprüfmaschine, nº série: 423/3; Certificação: nº 199 576-101 - CAL 0003;

- Termo Higrômetro - TH5, marca: Minipa, Calibração: Labelo, Certificado: J508879/2023 - CAL 0065;

- Paquímetro - P7 (0-200) mm, digital, marca: Mitutoyo - Certificado de calibração nº 89327/23 - CAL 0536;

- Termopar GULTerm 200 - PT100-3, certificado de calibração nº: RBC nº 82757/22 - CAL 0536;

### Observações:

- O Relatório de Ensaio não pode ser reproduzido sem a aprovação do laboratório, exceto se for reproduzido na íntegra.

UCS Serviços Tecnológicos – Universidade de Caxias do Sul – Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 – CEP: 95070-560 – Caxias do Sul/RS  
Telefone: (54) 3218 2155 ou (54) 3218 2168

email: lamec@ucs.br – http://www.ucs.br/site/servicos-tecnologicos/lamec

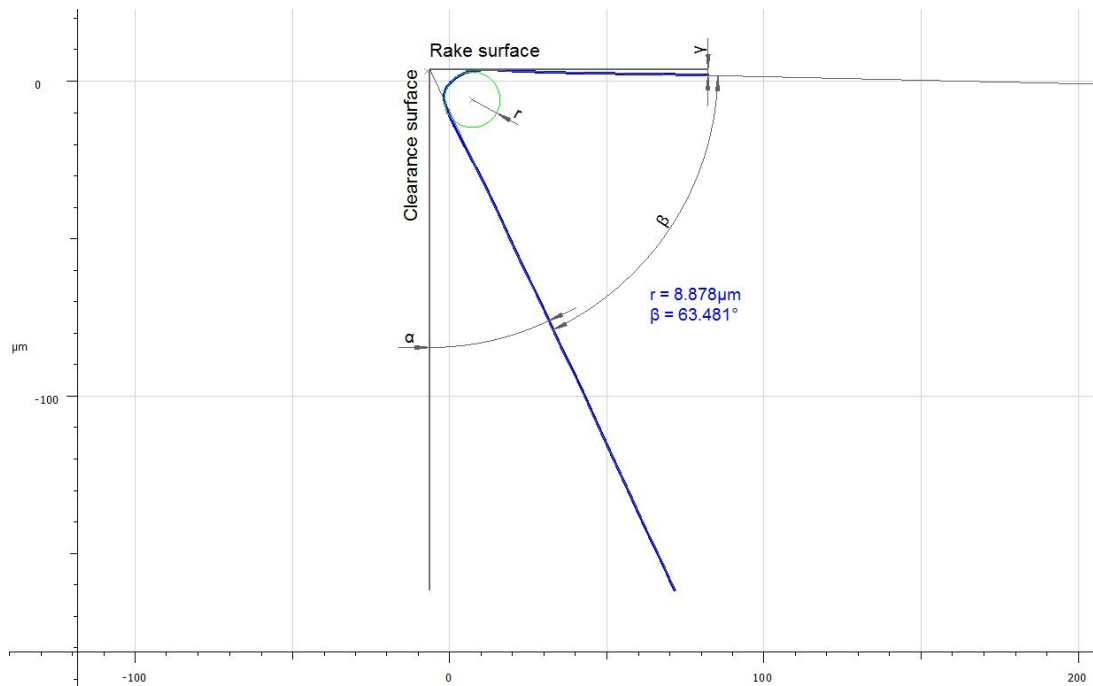
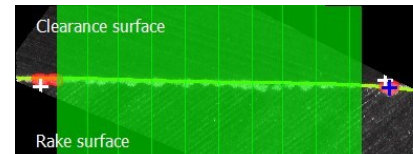
**Figura 52.** Ensaio de impacto do CP de AISI P20 (O autor, 2025).

## ANEXO C – RELATÓRIO ALICONA

### Measurement Report - EdgeMasterModule

Date of Measurement: 23/10/2024 15:37:16 Operator: Luiz Junior  
 Edge Profile Type: No Bevel  
 Reference Type: Edge Quality 10x - Solid Carbide Drills

Name	Value	Unit	Description
r	8.878	$\mu\text{m}$	Mean radius of mean edge
$\alpha$	25.238	$^{\circ}$	Clearance angle
$\beta$	63.481	$^{\circ}$	Wedge angle
$\gamma$	1.282	$^{\circ}$	Rake angle
$\varphi$	-853.774e-9	$^{\circ}$	Symmetry angle
S $\alpha$	12.379	$\mu\text{m}$	Dist. apex to end of clearance roundness
S $\gamma$	16.916	$\mu\text{m}$	Dist. apex to end of rake roundness
K	1.366		Symmetry of cutting edge
$\Delta r$	8.117	$\mu\text{m}$	Min. dist. of edge to apex
W $\Delta r$	9.945	$\mu\text{m}$	Edge width
Ecq	0.162	$\mu\text{m}$	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Trumpet		Estimated Curvature
Rmean_robust	8.279	$\mu\text{m}$	Mean radius in areas without defects



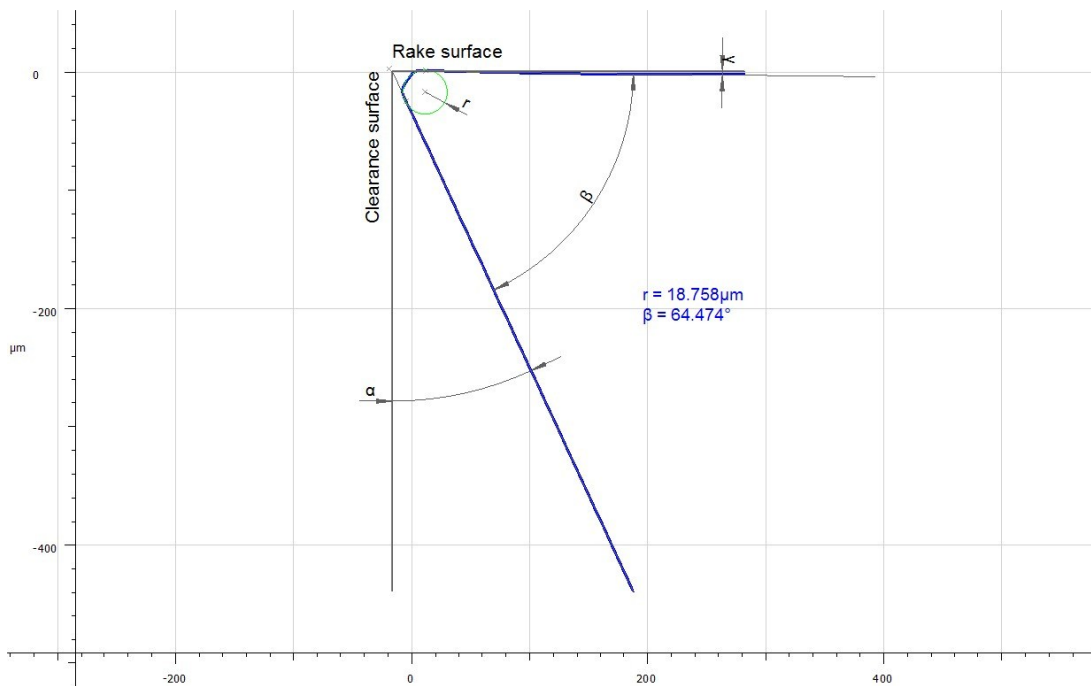
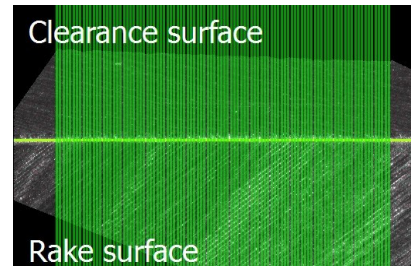
Measurement performed by Alicona EdgeMasterModule, 23/10/2024 15:37:16

**Figura 53.** Relatório gerado no Alicona para uma das ferramentas da condição STD (O autor, 2025).

# Measurement Report - EdgeMasterModule

Date of Measurement: 12/11/2024 15:47:34 Operator: Luiz Junior  
 Edge Profile Type: No Bevel  
 Reference Type: Edge Quality 10x - Solid Carbide Drills

Name	Value	Unit	Description
r	18.758	μm	Mean radius of mean edge
$\alpha$	24.851	°	Clearance angle
$\beta$	64.474	°	Wedge angle
$\gamma$	0.675	°	Rake angle
$\varphi$	0.000	°	Symmetry angle
S $\alpha$	29.336	μm	Dist. apex to end of clearance roundness
S $\gamma$	28.599	μm	Dist. apex to end of rake roundness
K	0.975		Symmetry of cutting edge
$\Delta r$	17.911	μm	Min. dist. of edge to apex
W $\Delta r$	21.327	μm	Edge width
Ecq	0.441	μm	Form deviation of circle (RMS)
Ftype			Estimated Curvature
Rmean_robust	19.003	μm	Mean radius in areas without defects



Measurement performed by Alicona EdgeMasterModule, 12/11/2024 15:47:34

**Figura 54.** Relatório gerado no Alicona para uma das ferramentas condição EP (O autor, 2025).