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

DANIEL SERAFIN

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DO GUME NO DESGASTE DE BROCAS HELICOIDAIS DE METAL-DURO NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO NODULAR

CAXIAS DO SUL
2025

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

DANIEL SERAFIN

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DO GUME NO DESGASTE DE BROCAS HELICOIDAIS DE METAL-DURO NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO NODULAR

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica peça Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de concentração: Processos de fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann

CAXIAS DO SUL
2025

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

S481i Serafin, Daniel
Influência do tratamento do gume no desgaste de brocas helicoidais de metal-duro na usinagem de ferro fundido nodular [recurso eletrônico] / Daniel Serafin. – 2025.
Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.
Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.
Modo de acesso: World Wide Web
Disponível em: https://repositorio.ucs.br

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

CDU 2. ed.: 621.98

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Márcia Servi Gonçalves - CRB 10/1500

DANIEL SERAFIN

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DO GUME NO DESGASTE DE BROCAS HELICOIDAIS DE METAL-DURO NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO NODULAR

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica peça Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de concentração: Processos de fabricação.

Caxias do Sul, 11 de Julho de 2025.

Banca Examinadora

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

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

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

Profa. Dra. Camila Baldasso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

CAXIAS DO SUL

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, à minha família, em especial aos meus pais, meu irmão e minha noiva, por todo apoio, ensinamentos e incentivos durante a minha vida acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, registro minha profunda gratidão pela orientação, disponibilidade e dedicação ao longo de todo o processo. Sua experiência, conhecimento científico e incentivo foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento como pesquisador.

A Universidade de Caxias do Sul (UCS), agradeço por ter me proporcionado a estrutura necessária para a realização desta pesquisa, oferecendo um ambiente acadêmico que estimula o desenvolvimento científico e humano.

Ao grupo de usinagem (GUS), pela parceria e pelo ambiente de cooperação que agregou muito ao trabalho, tornando-o mais produtivo. A troca de conhecimentos e experiências contribuiu significativamente para a qualidade da pesquisa.

Aos técnicos dos laboratórios da UCS, agradeço pelo apoio na execução dos experimentos e pela competência, contribuindo para obtenção de resultados confiáveis deste estudo.

Agradeço à empresa Castertech Fundição e Tecnologia Ltda, que realizou os testes de usinagem, pela disponibilização de recursos e pela colaboração prática que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho em um ambiente industrial.

Agradeço, em especial, à empresa Secta Tools Indústria de Ferramentas e ao Sr. Marcelo Ruziska, pela confiança depositada no projeto, pelo apoio institucional e pelo incentivo constante, fortalecendo a relação entre universidade e indústria.

Por fim, ao programa MAI/DAI e ao CNPq, pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa científica, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o fortalecimento da integração entre academia e setor produtivo.

RESUMO

O desempenho e a confiabilidade das ferramentas de usinagem são significativamente afetados pela microgeometria da ferramenta. Embora após a retificação a ferramenta já tenha boa capacidade de corte, geralmente apresentam microdefeitos como trincas e rebarbas, levando a um alto grau de instabilidade no gume. Esses defeitos aumentam os riscos de lascamentos e outros desgastes do gume, definindo prematuramente o fim da vida útil da ferramenta. Fornecer uma preparação do gume adequada é importante para reduzir defeitos nas ferramentas, possibilitar um corte mais estável e, consequentemente, aumentar a sua vida útil. O principal objetivo desse trabalho é avaliar a influência de diferentes preparações do gume no desgaste de brocas helicoidais escalonadas de metal duro. Foram utilizadas brocas tratadas com o processo de escovagem, acabamento por arraste abrasivo e também brocas sem tratamento de gume. Os parâmetros dos testes de usinagem não foram alterados e a peça de trabalho é de ferro fundido nodular. Como análises foram avaliados os gumes gerados após os tratamentos de gume, caracterizados usando microscópios ópticos para verificação de defeitos e o microscópio Alicona para verificação do tamanho do raio gerado. Após um determinado número de furos realizados pelas ferramentas mediu-se o desgaste do flanco máximo para verificar o desgaste e avaliou-se os tipos e os mecanismos de desgaste através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados apontaram que os tratamentos utilizados foram eficazes no tratamento do gume, suavizando e eliminando possíveis defeitos. No desempenho, as brocas com tratamento de gume por escovamento e arraste abrasivo apresentaram desempenho semelhante e maior que a broca sem tratamento de gume, apresentando respectivamente, um desempenho médio superior de aproximadamente 55% e 59% acima em relação a broca sem tratamento. Em relação ao desgaste das ferramentas, os resultados obtidos ao longo dos testes de usinagem evidenciam que os tratamentos de gume aplicados nas brocas desempenharam um papel significativo no controle dos desgastes de adesão e abrasão, predominantes no processo de furação de ferro fundido.

Palavras-chave: Usinagem. Preparação do gume. Furação. Desgaste da ferramenta.

ABSTRACT

The performance and reliability of machining tools are significantly affected by the microgeometry of the tool. Although after grinding the tool already has good cutting capacity, it generally has micro-defects such as cracks and burrs, leading to a high degree of instability in the cutting edge. These defects increase the risk of chipping and other wear on the cutting edge, prematurely defining the end of the tool's useful life. Providing adequate cutting edge preparation is important for reducing tool defects, enabling more stable cutting and, consequently, increasing tool life. The main objective of this work is to evaluate the influence of different cutting edge preparations on the wear of cemented carbide step drills. Drills treated with the brushing process, drag finishing and also untreated drills were used. The parameters of the machining tests were not altered and the workpiece was made of nodular cast iron. As analyses, the cutting edges generated after the cutting edge treatments were evaluated, characterized using optical microscopes to check for defects and the Alicona microscope to check the size of the radius generated. After a certain number of holes had been drilled by the tools, the maximum flank wear was measured to check for wear and the types and mechanisms of wear were evaluated using a scanning electron microscope (SEM). The results showed that the treatments used were effective in treating the cutting edge, smoothing and eliminating possible defects. In terms of performance, the drills with edge treatment by brushing and drag finishing showed similar performance, and higher than the drill without edge treatment, with an average performance approximately 55% and 59% higher than drill bits without treatment, respectively. With regard to tool wear, the results obtained during the machining tests show that the cutting edge treatments applied to the drills played a significant role in controlling adhesion and abrasion wear, which are predominant in the cast iron drilling process.

Keywords: Machining. Edge preparation. Drilling. Tool wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de furação 17
Figura 2 - Broca helicoidal com haste 18
Figura 3 - Divisão da geometria de uma ferramenta de corte. 19
Figura 4 - Principais nomenclaturas da geometria da parte cortante de uma broca helicoidal 20
Figura 5 - Principais ângulos e raio de quina de uma broca helicoidal. 20
Figura 6 - Classificação das brocas baseando-se no ângulo de hélice 21
Figura 7 - Transição entre micro e macrogeometria 22
Figura 8 - Mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte 25
Figura 9 - Tipos de desgastes em uma broca helicoidal 28
Figura 10 - Formas de medição de desgastes nos gumes 28
Figura 11 - Curva de comportamento do desgaste 29
Figura 12 - Aspectos e benefícios do tratamento de gume 31
Figura 13 - Microgeometrias dos processos de tratamento de gumes 32
Figura 14 - Proporção de custos 32
Figura 15 - Processos de tratamentos de gumes 33
Figura 16 - Tratamento de escovagem 35
Figura 17 - Tratamento por arraste abrasivo 36
Figura 18 - Forma de preparação do gume das ferramentas 37
Figura 19 - Desempenho das brocas 38
Figura 20 - Superfície das brocas sem tratamento, chanfradas e arredondadas 39
Figura 21 - Desempenho das brocas sem tratamento, chanfradas e arredondadas 39
Figura 22 - Curva de comportamento do desgaste das diferentes condições 40
Figura 23 - Análise dos mecanismos de desgaste 40
Figura 24 - Plano de ensaios experimentais 43
Figura 25 - Combinações propostas 44
Figura 26 - Procedimentos para fabricação da ferramenta 45
Figura 27 - Geometria das ferramentas 46
Figura 28 - Tratamento de escovagem 48
Figura 29 - Tratamento por arraste abrasivo 49
Figura 30 - Detalhe ilustrativo da furação 50
Figura 31 - Comparação das ferramentas retificadas, sem tratamento de gume e com tratamentos 53

Figura 32 - Medição dos raios dos gumes das brocas helicoidais 54
Figura 33 - Curva de comportamento do desgaste de cada broca até 4800 furos 56
Figura 34 - Comparação do desgaste médio das brocas por tipo de tratamento 57
Figura 35 - Desgaste de flanco em cada fase dos testes de usinagem 59
Figura 36 - Microlascamentos na broca sem tratamento de gume após 1.600 furos 60
Figura 37 - Mecanismo de desgaste do gume principal da broca com tratamento por escovagem 60
Figura 38 - Mecanismos de desgaste do gume secundário da broca com tratamento por escovagem 61
Figura 39 - Mecanismo de desgaste do gume principal da broca com tratamento por arraste. 61
Figura 40 - Mecanismos de desgaste do gume secundário da broca com tratamento por arraste 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Referências utilizadas para coleta de dados 14
Tabela 2 - Condições do processo de escovagem 48
Tabela 3 - Condições do processo de arraste abrasivo 49
Tabela 4 - Composição química do ferro fundido nodular GGG40 50
Tabela 5 - Parâmetros de corte utilizados nos testes de usinagem 51
Tabela 6 - Fator K médio de cada gume 54
Tabela 7 - Raios gerados após o tratamento de gume 55
Tabela 8 - Teste de comparações múltiplas Tukey 58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 JUSTIFICATIVA 13
1.2 OBJETIVO 16
1.2.1 Objetivo geral 16
1.2.2 Objetivos específicos 16

2 REFERENCIAL TEÓRICO 17
2.1 FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS 17
2.2 GEOMETRIA DE BROCAS HELICOIDAIS 19
2.3 USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO 23
2.4 DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE 24
2.4.1 Mecanismos de desgaste 25
2.4.1.1 Abrasão 25
2.4.1.2 Adesão 26
2.4.1.3 Oxidação 26
2.4.1.4 Difusão 27
2.4.2 Tipos de desgastes em brocas helicoidais 27
2.4.3 Comportamento do desgaste 28
2.4.4 Determinação do fim de vida da ferramenta 30
2.5 PROCESSO DE PREPARAÇÃO DO GUME 30
2.5.1 Processos de tratamento de gumes 33
2.5.1.1 Tratamento de escovagem 34
2.5.1.2 Tratamento por arraste abrasivo 35
2.5.2 Influência dos tratamentos de gumes no desgaste da ferramenta 36

3 MATERIAIS E MÉTODO 42
3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E MÉTODO DA PESQUISA 42
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 42
3.2.1 Variáveis de entrada 43
3.2.2 Variáveis de saída 45
3.2.3 Ferramenta 45
3.2.4 Tratamento dos gumes 47

3.2.4.1 Tratamento de escovagem 47
3.2.4.2 Tratamento por arraste abrasivo 48
3.2.5 Definição do material do corpo de prova 50
3.2.6 Processo de furação 51
3.2.7 Equipamentos 51
3.2.8 Análise estatística dos resultados 52

4 RESULTADOS 53
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GUMES 53
4.2 DESEMPENHO DAS FERRAMENTAS 55
4.3 DESGASTES DAS FERRAMENTAS 59

5 CONCLUSÕES 64

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 65

REFERÊNCIAS 66

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a usinagem é, indiscutivelmente, o processo de fabricação mais utilizado na produção industrial, que converte a matéria-prima bruta em um formato desejado, com precisão geométrica e superficial, através da interação entre o corte da ferramenta e a peça (LI et al., 2022).

Devido ao destaque dos processos de usinagem na maioria dos segmentos da manufatura moderna, há um aumento na competitividade do mercado globalizado, o que leva a obter como requisitos importantes durante o processo de usinagem o baixo custo e menores tempos de processo. Porém, as condições às quais as ferramentas são submetidas tornam os processos cada vez mais severos, reduzindo a vida útil das ferramentas (ZEILMANN e BORDIN, 2014).

A necessidade de melhoria do desempenho das ferramentas, visando suprir a necessidade do mercado, demarcaram a evolução do processo de usinagem. Nos últimos anos o desenvolvimento de novos conceitos em ferramentas de corte tem sido focado em quatro aspectos: novos substratos para as ferramentas de corte, engenharia de superfície e revestimento, otimização da geometria e novas abordagens para a preparação do gume (RODRIGUEZ, 2009).

Significativas melhorias no processo de fabricação de ferramentas de corte podem ser claramente reconhecidas nas últimas décadas. Os fabricantes são capazes de produzir uma ampla gama de ferramentas de corte com diferentes substratos, macrogeometrias especializadas, com revestimento adequando e microgeometria do gume específico para diferentes aplicações. Entretanto, fronteiras técnicas, dentro da precisão exigida no processo de usinagem, ainda não foram superadas, principalmente tratando-se da microgeometria do gume (BASSETT et al, 2012; RAMESH, 2015).

Conforme Wang et al. (2020), a preparação do gume é a micromoldagem do gume de ferramentas de corte afiadas, que pode remover defeitos iniciais do gume, substituindo-os por um perfil liso, melhorando a qualidade da ferramenta. Dessa forma, o tratamento do gume visa criar uma microgeometria com melhor estabilidade, para reduzir lascamentos e melhorar a integridade da superfície da ferramenta, proporcionando um processo com melhor ação de corte e fluxo de cavacos.

Nesse contexto, este trabalho busca investigar a influência do tratamento do gume no desgaste e vida útil de brocas helicoidais utilizadas para a usinagem de ferro fundido nodular utilizando os processos de escovagem e arraste abrasivo.

1.1 JUSTIFICATIVA

O desempenho de uma ferramenta de corte é significativamente influenciado pela microgeometria da ferramenta (DENKENA e BIERMANN, 2014; LI et al., 2022; KLOCKE, 2018). Após a retificação de uma ferramenta, o gume pode apresentar uma série de microdefeitos, tais como microtrincas, lascas, rebarbas e outros danos na superfície da ferramenta. Esses microdefeitos podem gerar cortes instáveis, desgaste elevado, baixa confiabilidade e diminuição da qualidade da peça usinada (TIKAL, 2009; KLOCKE, 2018). A preparação do gume adequada e de forma controlada tem como propósito minimizar ou eliminar microdefeitos gerados nos processos de fabricação anteriores, impactando diretamente na confiabilidade, desempenho e qualidade do processo de usinagem. (RAMESH, 2015; KLOCKE, 2018; LI et al., 2022).

Além de contribuições destacadas em relação ao desempenho da ferramenta, confiabilidade no processo e qualidade da peça usinada, o aperfeiçoamento da microgeometria do gume permite um ganho econômico. De acordo com Tikal (2009), Bauel e Hezler (2015), os custos de tratamento do gume representam entre 10% e 14% dos custos de fabricação. Entretanto, estudos relacionados ao tratamento de gumes em ferramentas de usinagem mostram aumentos de vida útil de mais de 300%, justificando gastos necessários para a aplicação dos tratamentos. Entre alguns estudos pode-se citar: (RODRIGUEZ, 2009; WANG et al., 2020; BIERMANN e TERWEY, 2008).

Complementando, nos últimos anos têm aumentado a busca de técnicas na usinagem para uma fabricação sustentável. Apesar de melhorias nas atividades industriais, a usinagem sustentável é associada principalmente ao uso de fluidos de corte, ou seja, resíduos desperdiçados e maior custo na compra, armazenamento e descarte de fluidos. Com a busca por técnicas de usinagem mais ecológicas e ao mesmo tempo o benefício do avanço em máquinas-ferramentas e ferramentas de corte, a preparação adequada de gumes apresenta-se com enorme potencial, com a intensão de melhorar a resistência ao desgaste da ferramenta e qualidade da superfície, possibilitando eliminação ou diminuição da utilização de fluidos de corte, além da redução de custos de fabricação e consumo de energia. (LI et al., 2022).

Para a definição dos tratamentos, realizou-se a leitura de artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado relacionados diretamente a tratamento de gumes ou que mencionavam de alguma forma a importância da preparação do gume e os tipos de tratamento utilizados em ferramentas de corte. A Tabela 1 mostra a categoria de pesquisa, os autores e os temas das pesquisas dos estudos verificados.

Tabela 1 - Referências utilizadas para coleta de dados

Categoria de pesquisa	Autores	Tema da pesquisa
Tese de doutorado	Rodriguez, C.J.C (2009)	Preparação do gume em ferramentas de corte de precisão por meio dos processos de jato microabrasivo e escovamento
Artigo	Denkena e Biermann (2014)	Geometrias do gume
Artigo	Wang, W. et. al (2020)	Efeito das tecnologias de preparação de gume nas propriedades do gume e desempenho da ferramenta.
Artigo	Li, B. (2022)	Estado da arte em desempenho de corte e integridade da superfície considerando a microgeometria do gume da ferramenta no processo de corte de metal
Artigo	Straka, R. et. al (2021)	Comparação de métodos de preparação do gume em termos de vida útil da ferramenta e rugosidade superficial
Dissertação de mestrado	Bordin, F.M.	Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobrea integridade superficial dos furos
Artigo	Wang, H. (2011)	Preparação do gume de ferramentas de metal-duro com o método de escovas abrasivas
Artigo	Biermann, D. et. al (2012)	Preparação do gume para melhorar o desempenho de brocas de canal reto para furo profundo
Artigo	Cheung, F.Y. et. al (2008)	Preparação do gume utilizando polimento magnético e sua influência no desempenho de brocas de aço rápido
Artigo	Hartig, J. et. al (2022)	Preparação do gume com rebolos diamantados: Influência da interação do fluido de usinagem e do rebolo nas propriedades do rebolo e no resultado da preparação
Artigo	Ramesh, V. (2015)	Preparação do gume
Artigo	Santana, M. I. e Polli, M. L. (2022)	Efeitos da preparação do gume na vida útil da ferramenta na furação do aço SAE4144M
Artigo	Santana, M. I. (2015)	A influência da preparação do gume principal da broca helicoidal no processo de furação
Artigo	Zhao, X. et. al (2021)	Experimento e modelagem de força de fresamento com base preparação do gume
Artigo	Lv, D. (2022)	Análise de abrasivos na preparação do gume no processo de arraste
Artigo	Pérez-Salinas, C. E. et. al (2022)	Estimativa do efeito do abrasivo do acabamento por arraste na preparação do gume em ferramenta de brochamento
Artigo	Biermann, D. et al (2016)	Jateamento abrasivo úmido para preparar e projetar o micro formato do gume
Artigo	Yussefian, N.Z. et al (2010)	Preparação do gume por eletroerosão de ferramentas de corte

Artigo	Vozar, M. et. al (2020)	Influência dos parâmetros de acabamento por arraste no raio do gume de fresas inteiriças de metal-duro
Artigo	Shao, L. et al (2022)	Preparação do gume de pastilha de metal-duro pelo método de polimento e espessamento por cisalhamento assistido por fibra flexível
Artigo	Bordin, F.M. e Zeilmann, R.P. (2014)	Efeito da preparação do gume na integridade superficial após perfuração a seco
Artigo	Aurich, J.C e Effgen, C. (2015)	Influência das condições de usinagem na preparação do gume com rebolos
Artigo	Denkena, B. et al (2019)	Método inovador para preparação de gume com escovas flexíveis diamantadas
Artigo	Bergs, T. et al (2020)	Preparação de gumes simétricos e assimétricos em ferramentas de corte usando ferramentas de escovagem com grãos de diamante com filamento integrado
Trabalho de conclusão de curso	Buckell, W. (2019)	Avaliação da preparação de gume através do processo de escovação para aplicação em fresamento de topo reto
Artigo	Zeilmann, R.P. e Zanella, C. (2020)	Efeito do polimento do revestimento PCD no desgaste da ferramenta no fresamento em alta velocidade
Dissertação de mestrado	Ost, C.A. (2016)	Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrirrefrigerantes

Fonte: Autor (2025).

Posteriormente, filtrou-se os tipos de tratamentos mais utilizados no tratamento do gume em brocas helicoidais. Desta forma, verificou-se que os processos de escovagem com escovas de naylon abrasivo, o processo de acabamento por arraste abrasivo e o de jateamento úmido destacaram-se para o tratamento dos gumes em brocas helicoidais. No entanto, devido a disponibilidade de equipamentos, facilidade e custos de aplicação, neste trabalho definiu-se apenas os processos de escovagem e de arraste abrasivo.

Em relação a modificação da microgeometria do gume, para ambos os processos buscou-se aplicar condições com o objetivo de gerar um arredondamento no gume na faixa de 65 µm a 80 µm. Valor definido de acordo com (OTEC, 2017), que recomenda a utilização de um raio do gume de aproximadamente 5 µm vezes o diâmetro da ferramenta para a usinagem de ligas de ferro fundido. Além disso, estudo realizado por (BARBOSA, 2021), comparou o desempenho de uma ferramenta na furação de ferro fundido utilizando brocas helicoidais com raio do gume de 40 µm, 80 µm, 120 µm e 160 µm, o qual a utilização da ferramenta com raio de 80 µm apresentou melhor desempenho, quando analisado a vida da ferramenta.

Dessa forma, o trabalho busca responder a seguinte pergunta: como a modificação da microgeometria dos gumes influencia no desgaste da ferramenta de corte utilizando dois métodos de tratamento de gumes para o processo de furação em ferro fundido nodular?

1.2 OBJETIVO

A seguir são definidos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do tratamento do gume sobre o desgaste de brocas helicoidais na usinagem de ferro fundido.

1.2.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos podem ser definidos:

a) Propor condições para o tratamento por arraste e por escovagem para aplicar uma microgeometria no gume, que seja adequada nas brocas helicoidais;
b) Avaliar os gumes gerados a partir dos processos de arraste abrasivo e escovagem;
c) Verificar os tipos e mecanismos de desgaste gerados nas brocas helicoidais; e
d) Avaliar a influência da modificação da microgeometria dos gumes no desgaste das ferramentas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS

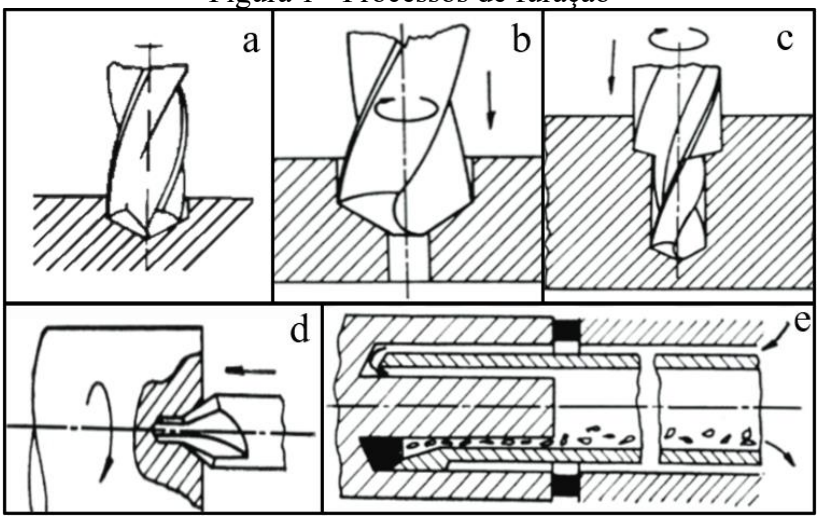
O termo furação refere-se ao método de usinagem com movimento principal rotativo, no qual a ferramenta tem apenas um movimento de avanço na direção do eixo rotativo da ferramenta (KLOCKE, 2011).

Objetivos diferentes em relação à taxa de remoção de material, profundidade de perfuração, precisão e qualidade da superfície levou ao desenvolvimento de diferentes processos de furação. De acordo com a norma NBR 6175 a furação subdivide-se nas operações:

a) Furação em cheio: consiste na abertura de um furo removendo todo o material contido no volume do furo final em forma de cavaco. No caso de furos de grande profundidade, pode haver a necessidade de utilização de ferramentas especiais.
b) Escareamento ou furação prévia: consiste na formação de um furo cilíndrico em uma peça já furada inicialmente.
c) Furação escalonada: processo de furação com o objetivo de obter um furo com dois diâmetros simultaneamente.
d) Furação de centros: processo que consiste na obtenção de furos de centro, visando uma operação posterior na peça.
e) Trepanação: processo de furação onde nem todo o volume do furo final é reduzido em forma de cavaco, mantendo-se um núcleo maciço.

A Figura 1 ilustra essas operações.

Figura 1 - Processos de furação



Fonte: Adaptado de NBR 6175 (2015).

O processo de furação compreende cerca de 33% de todas as operações de usinagem, tornando-se assim um dos processos de corte de material mais importantes. (FRACARO, 2017).

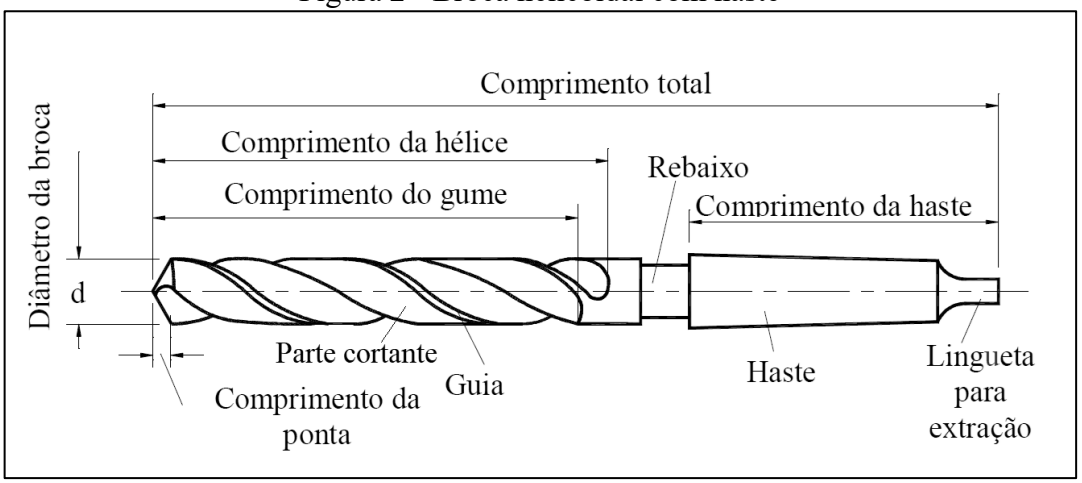
Segundo Klocke (2011), como qualquer processo de usinagem, a furação conta com algumas particularidades que, muitas vezes, dificultam sua compreensão. Essas particularidades incluem:

a) A velocidade de corte varia de um valor máximo na extremidade até o valor zero seu centro;
b) Dificuldade na remoção do cavaco;
c) Distribuição de calor desfavorável na região de corte;
d) Maior desgaste nas quinas; e
e) Atrito das guias na parede do furo.

As brocas helicoidais ocupam a posição de maior importância no processo de furação, pois é a ferramenta mais utilizada na fabricação de furos cilíndricos a partir de um material sólido ou para ampliar um diâmetro de um furo já existente. Estima-se que a participação de brocas helicoidais no total de processos de usinagem é de 20% a 25%, sendo também a ferramenta mais fabricada e mais difundida para a usinagem (KLOCKE, 2011; FRACARO, 2017).

De modo geral, uma broca helicoidal compreende uma haste e uma parte cortante, conforme Figura 2.

Figura 2 - Broca helicoidal com haste



Fonte: Adaptado de Klocke (2011) e Bordin (2013).

Apenas em análises detalhadas observa-se a geometria mais complexa, principalmente na sua ponta. Há cerca de 150 tipos diferentes de afiação de brocas e uma série de perfis

específicos, onde se tenta garantir qualidade e desempenho adequado na furação de diferentes materiais e inúmeras tarefas. Demanda-se muito trabalho para conseguir métodos analíticos que permitam otimizar as solicitações mecânicas de uma broca. Portanto, é importante conhecer a geometria da cunha da broca, da cinemática do processo de furação e também o efeito dos fatores que influenciam no processo de furação (KLOCKE, 2011; FRACARO, 2017).

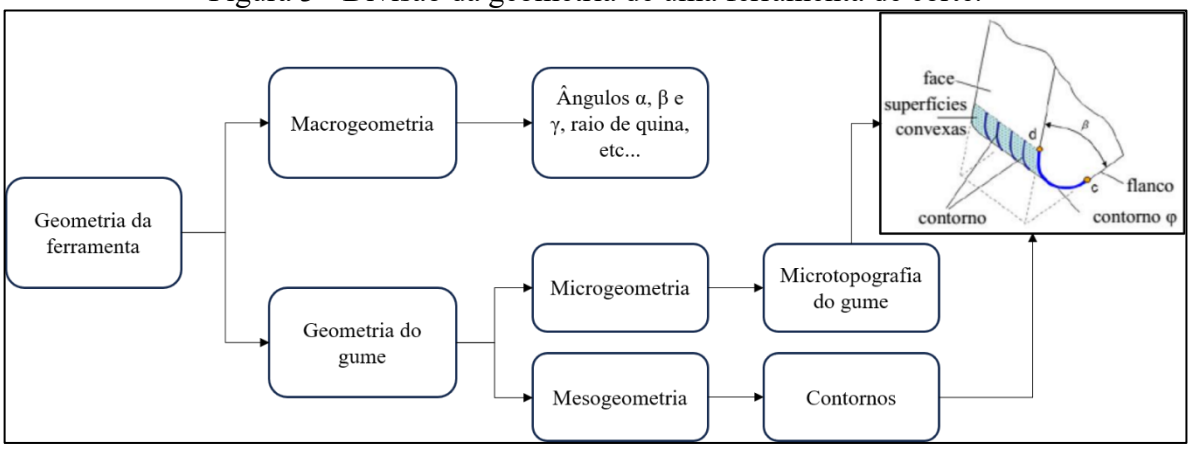
2.2 GEOMETRIA DE BROCAS HELICOIDAIS

As brocas helicoidais, assim como todas as ferramentas utilizadas nos processos de usinagem, têm seu desempenho afetado diretamente por sua geometria (EISING, 2014).

A forma básica das brocas existe desde o século XIX. A divisão geralmente é baseada no comprimento, diâmetro e parte cortante da broca. Desde o ano 1970, um grande número de afiações com diferentes padrões foi definido (RISSE, 2006). Atualmente, a nomenclatura das partes constituintes das brocas helicoidais é definida pela norma NBR ISO 5419. Algumas partes apresentam variações geométricas, tais como a ausência de rebaixo, hastes cilíndricas ou cônicas, canais de refrigeração interna, entre outras.

De acordo com Rodriguez (2009), a geometria de uma ferramenta de corte pode ser dividida em: macro, meso e microgeometria. A macrogeometria inclui ângulos de corte, raio de quina, além de superfícies funcionais e características geométricas relacionadas ao resfriamento ou lubrificação do fluxo de cavaco. Na mesogeometria, são considerados os contornos correspondentes à superfície arredondada do gume, gerada pelo processo de preparação do gume. Já na microgeometria estão incluídas a microtopografia do gume. A Figura 3 apresenta esta divisão.

Figura 3 - Divisão da geometria de uma ferramenta de corte.

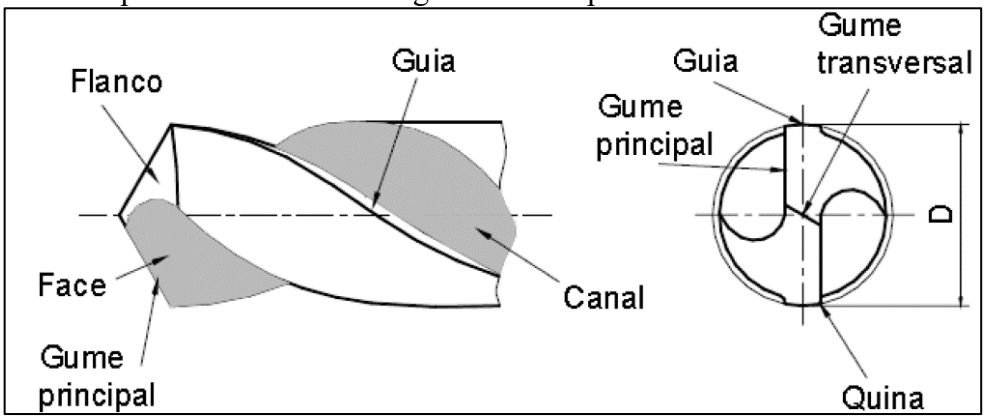


Fonte: Adaptado de Rodriguez (2009) e Bordin (2013).

A mesogeometria e microgeometria foram por muito tempo pouco consideradas pelos fabricantes de ferramentas, devido à falta de processo de manufatura com capacidade de produzir geometrias precisas e confiáveis (BORDIN, 2013). A partir do final do século XIX, pode-se perceber o crescimento de formas inovadoras de meso e microgeometria para atender a mais diversas demandas. Entretanto, as normas disponíveis não definem com precisão essas regiões, deixando assim a critério do fabricante (RISSE, 2006).

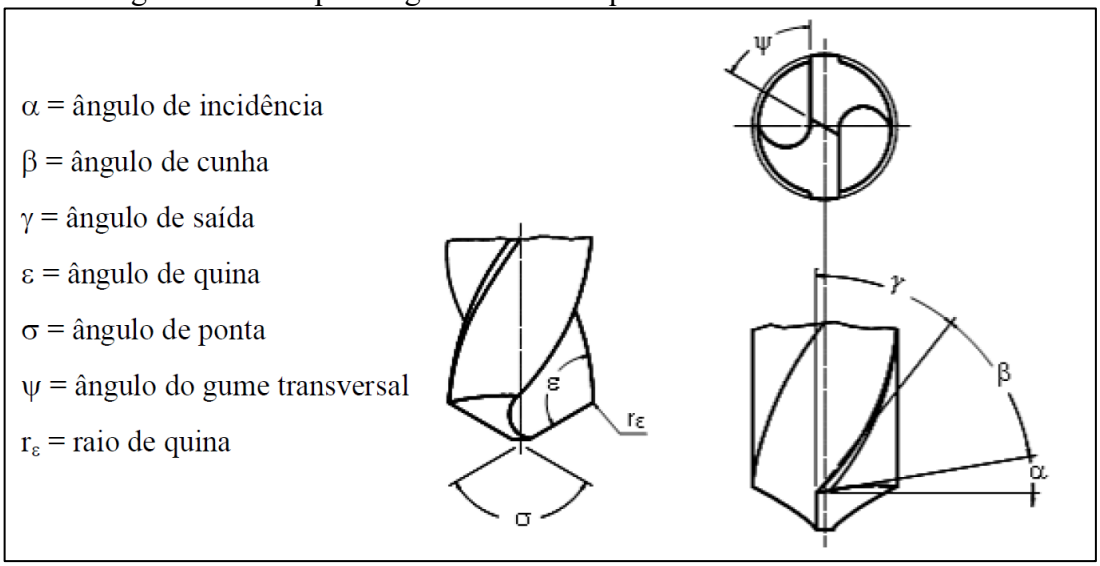
Referindo-se a macrogeometria, uma broca helicoidal é composta de uma haste, responsável pela fixação da broca na máquina e uma parte cortante, as Figuras 4 e 5 mostram, de forma simplificada, a geometria e a nomenclatura das principais regiões que compreendem a parte cortante da ferramenta, além de vários ângulos que definem e afetam diretamente o desempenho de uma broca helicoidal.

Figura 4 - Principais nomenclaturas da geometria da parte cortante de uma broca helicoidal



Fonte: Adaptado de Klocke (2018).

Figura 5 - Principais ângulos e raio de quina de uma broca helicoidal.



Fonte: Adaptado de Klocke (2011) e Bordin (2013).

Os gumes principais se mostram no sentido do avanço, e o gume transversal torna-se uma parte integrante do gume principal, porém, em decorrência do ângulo de saída negativo, praticamente não uma função de corte, mas sim deforma o material plasticamente e o extruda em direção a parte cortante do gume principal (KONIG e KLOCKE, 1997; FRACARO, 2017).

A forma e o ângulo de hélice (δ) definem o ângulo de saída γ, que não é constante ao longo do gume principal, mas sim apresentam o seu valor máximo na quina da broca e diminui no sentido do centro da broca, tornando-se negativo na passagem para o gume transversal (KONIG e KLOCKE, 1997; FRACARO, 2017).

De acordo com Tschatsch (2008) e Fracaro (2017), quanto ao ângulo de hélice, as brocas helicoidais podem ser classificadas em 3 tipos:

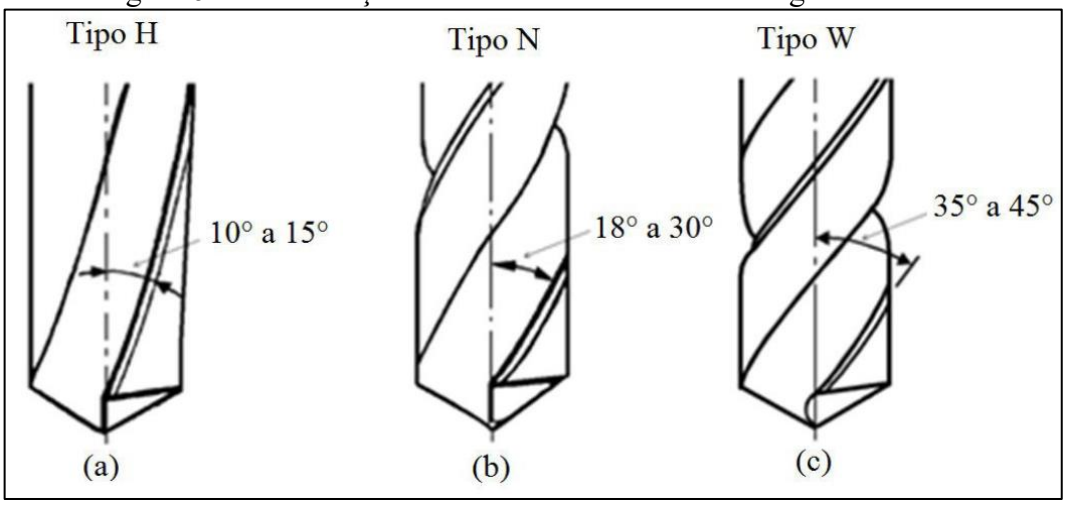
a) Tipo H: Apresenta passo longo e é recomendado para materiais que formam cavacos curtos (materiais duros e frágeis);

b) Tipo N: Apresenta passo normal e é recomendado para materiais comuns, como aços, ferros fundidos e similares;

c) Tipo W: Apresenta passo curto e é recomendado para materiais que formam cavacos longos (materiais dúscteis).

A Figura 6 ilustra a classificação baseando-se no ângulo de hélice.

Figura 6 - Classificação das brocas baseando-se no ângulo de hélice

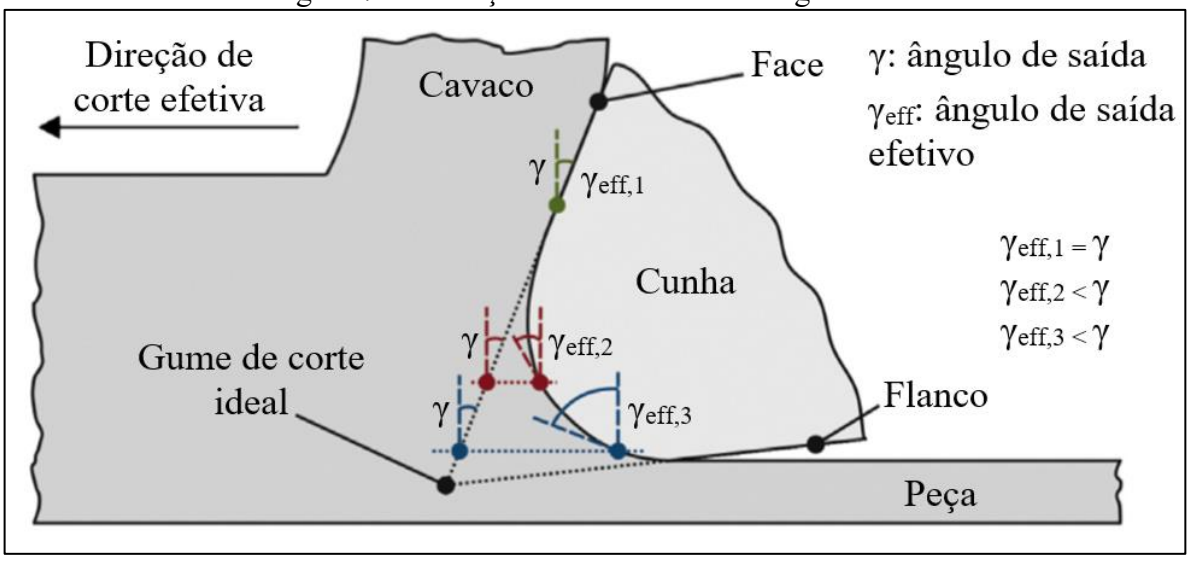


Fonte: Adaptado de Klocke (2018).

Diferente da macrogeometria, que representa as dimensões espaciais da ferramenta, a microgeometria concentra-se na geometria da parte ativa da ferramenta e define a forma do gume, que é a transição entre a face de saída e flanco de uma cunha de corte.

A distinção apropriada entre macro e microgeometria é necessária devido a relação e condições de contato entre a ferramenta e a peça, e consequentemente a formação do cavaco. O ângulo de inclinação ou ângulo de saída (γ) é determinado pela forma da ferramenta macrogeometrica e pode estar relacionado a forma da cunha ou à orientação de um chanfro. Já o ângulo de inclinação efetivo ou ângulo de saída efetivo (γ_{eff}) é especificado pelo ângulo de saída da ferramenta em um determinado ponto de contato da peça e ferramenta de corte. A seção da ferramenta de corte onde o ângulo de saída efetivo começa a diferenciar-se do ângulo de saída, define-se como a transição entre macro e microgeometria. A Figura 7 ilustra a transição entre a micro e macrogeometria (DENKENA e BIERMANN, 2014).

Figura 7 - Transição entre micro e macrogeometria



Fonte: Adaptado de Denkena e Biermann (2014).

Geralmente, para a forma do gume, três condições são definidas: gume afiado, gume arredondado e gume chanfrado. Também há a possibilidade de combinação de chanfros e formas arredondadas. Um gume afiado implica que a transição entre a face e o flanco não é arredondado e nem chanfrado. Na prática, não é possível produzir um formato ideal em um gume afiado, devido ao fato de que gumes afiados possuem forma irregular, assim não há parâmetro específico para sua descrição. Além disso, gumes afiados não possuem forma arredondada ou chanfrada de forma mensurável, não sendo adequado para muitas tarefas devido à menor estabilidade em comparação com as demais formas (DENKENA e BIERMANN, 2014).

2.3 USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO

Os ferros fundidos são ligas que possuem geralmente entre 2% e 4% de carbono, além de outros elementos de liga comuns, como: silício, manganês, fósforo e enxofre. Outros elementos adicionais podem estar presentes em diferentes tipos de ferros fundidos, como: cobre, níquel, molibdênio e cromo. Esses materiais apresentam boa rigidez, resistem bem a cargas de compressão e possuem boa fluidez para preencher moldes de fundição. Através de tratamento térmico, sua resistência mecânica e ductilidade podem ser melhoradas. O carbono está presente na microestrutura do ferro fundido na forma de carbonetos (cementita) e como grafite. A forma do grafite depende da adição de outros elementos à liga (MACHADO et al., 2015).

Basicamente, os componentes dos ferros fundidos são os mesmos dos aços (cementita, perlita, ferrita, austenita), além desses, mostram-se também a grafita, ledeburita e steadita. A grafita, que se apresenta em veios ou lamelas, é utilizada para medir a usinabilidade dos ferros fundidos, conforme sua presença e forma de apresentação. A grafita possibilita melhor usinabilidade, devido sua contribuição na redução do atrito entre peça e ferramenta, além de auxiliar na formação de cavacos pequenos e quebradiços, exigindo menor força de corte e proporcionando maior vida à ferramenta.

Além da grafita ter influência na usinabilidade, a estrutura básica do metal ferro também exerce importância na usinabilidade, quando os ferros fundidos possuem estrutura ferrítica, que apresentam baixa resistência mecânica, melhora a usinabilidade. Com aumento de perlita, diminui-se a usinabilidade e aumenta o desgaste da ferramenta, devido a dureza elevada. Já ferros fundidos compostos por bainita, ledeburita e martensita apresentam grande resistência e dureza, diminuindo a usinabilidade (FRACARO, 2017).

O ferro fundido nodular, também conhecido como ferro fundido dúctil é fabricado adicionando pequenas quantidade de magnésio ou cério em ferros fundidos com alto teor de carbono ainda em estado líquido. Assim, como resultado, a estrutura apresenta o carbono em forma esferoidal, muito resistente e com boa elasticidade. Caracteriza-se por apresentar boa usinabilidade, entretanto, com normalização ou revenimento, torna-se quebradiço. Com o recozimento, aumenta-se a ductibilidade e mantém as características de corte. Para esses materiais recomenta-se, dependendo do tipo de corte e condições de processo, ferramentas de aço rápido, metal duro (grupo P e K), metal duro revestido e cerâmicas óxidas (FRACARO, 2017).

Por fim, algumas recomendações básicas devem ser seguidas para um bom desempenho na usinagem de ferro fundido (MACHADO et al., 2015).

a) Baixa porcentagem de carbono pode levar a dificuldades de usinagem, com menores porcentagem de veios de grafite e indução à fratura de cavacos;
b) Microestruturas com alta porcentagem de ferrita e alto teor de Sisão mais resistentes mecanicamente, menos dúcteis e têm menor tendência de gerar aresta postiça de corte, melhorando o processo de usinagem;
c) Aumento de perlita aumenta a dureza e a resistência mecânica, não permitindo altas velocidades de corte e de avanço, diminuindo o desempenho em usinagem;
d) Quanto mais refinada a estrutura lamelar, pior a usinabilidade, levando a menores valores de velocidade de corte e avanço;
e) Partes superiores da peça fundida concentram as piores impurezas, uma vez que tendem a ficar nas extremidades durante o envasamento do metal fundido;
f) Os principais tipos de desgaste durante a usinagem do ferro fundido são a abrasão, a adesão e a difusão. A abrasão é causada por carbonetos na microestrutura e por areia na superfície. A adesão pode vir de aresta postiça de corte em baixas velocidades. Já a difusão pode ser causada em altas velocidades de saída quando não se usam coberturas apropriadas.

2.4 DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

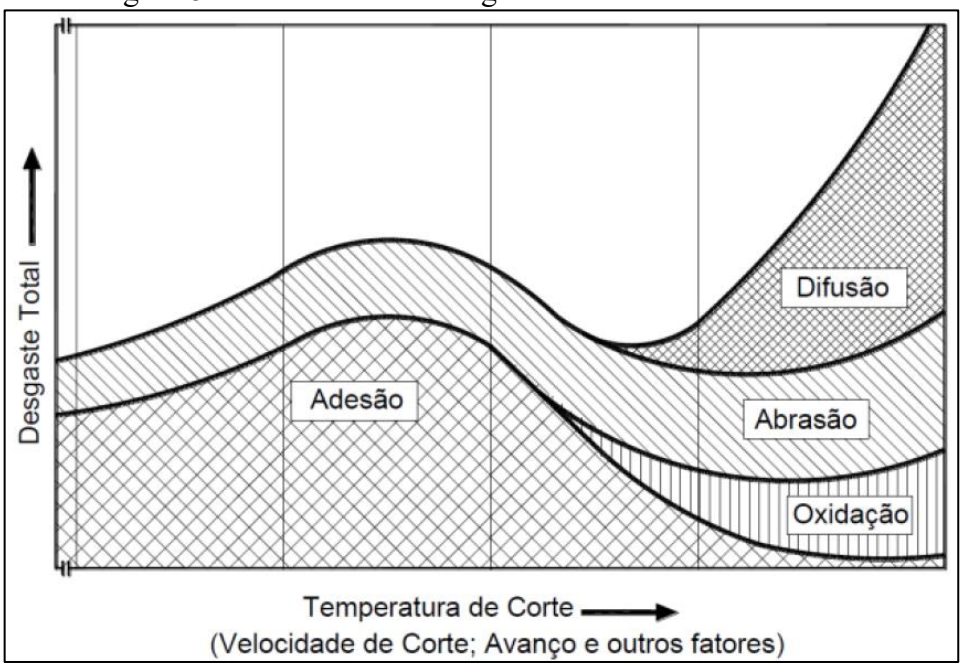
De acordo com Klocke (2018), entende-se por desgaste a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido, provocada por causas mecânicas, ou seja, contato de movimento relativo de um contra corpo sólido, líquido ou gasoso.

Durante o processo de corte, ocorrem processos de deformação, separação e fricção no gume. Os materiais de corte utilizados estão sujeitos a um coletivo de cargas complexas, caracterizadas por elevadas tensões de compressão, altas velocidades de corte e altas temperatura. Sob essas condições de corte, na prática, as ferramentas atingem o fim da sua vida útil devido ao desgaste crescente no gume (KLOCKE, 2018).

2.4.1 Mecanismos de desgaste

Existem alguns mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte, os principais podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 - Mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte



Fonte: Adaptado de Klocke (2018).

Os mecanismos de abrasão, adesão, difusão e oxidação são apresentados em função da temperatura de corte ou outros fatores que influenciam, principalmente velocidade de corte e avanço. Esses mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de tal forma que tanto sua causa, como seu efeito, dificilmente pode ser distinta entre si.

2.4.1.1 Abrasão

Como pode ser observado na Figura 8, a abrasão é um mecanismo crítico e predominante na usinagem, devido à dificuldade de eliminá-lo e influência direta na vida útil e performance da ferramenta.

A abrasão ocorre quando áreas ásperas do contra corpo ou partículas presentes como material intermediário penetram na superfície de corte do material e, simultaneamente fazem um movimento tangencial, produzindo marcas, micro cortes e micro fissuras (KLOCKE, 2018).

É um processo mecânico, o qual gera altas temperaturas no flanco e face da ferramenta. Quanto maior a dureza das partículas em relação a ferramenta, maior será a taxa de desgaste

abrasivo. Dessa forma, a resistência ao desgaste abrasivo está relacionada a dureza, ferramentas mais duram tendem a ser mais resistentes ao desgaste abrasivo. Além disso, o uso adequado de fluidos de corte e revestimentos específicos podem reduzir o impacto.

2.4.1.2 Adesão

Como mecanismo de desgaste, este processo é entendido em que ligações, na forma de micro soldas, são formadas na zona de contato entre o material usinado e o material da ferramenta de corte. Essas ligações são então deformadas, reforçadas e cortadas durante o movimento tangencial de atrito.

O processo de adesão pode ocorre por interação atômica (adesão química) entre os materiais, como processos de difusão termicamente induzidos, troca de elétrons ou polarização elétrica. Também, pode resultar de aderência mecânica da peça, que se tornou plasticamente deformável sob altas temperaturas, com o material da ferramenta de corte. (KLOCKE, 2018).

De forma geral, como observado na Figura 8, a adesão ocorre em velocidades de corte mais baixas e menores avanços. Pode ser diminuída com o aumento da velocidade de corte, consequentemente, aumentando a temperatura, e também acrescentando um revestimento na ferramenta.

2.4.1.3 Oxidação

A oxidação refere-se às reações químicas entre o material da ferramenta de corte e o material da peça, ou componentes do ambiente circundante, causadas pelo atrito. Como mostrado na Figura 8, geralmente ocorre em temperaturas mais elevadas. Esse processo modifica as propriedades da camada externa da ferramenta. Podem ser formados produtos de reação que são removidos com o cavaco ou permanecem aderidos à ferramenta como um revestimento.

A oxidação pode tanto aumentar quanto diminuir o desgaste. O aumento do desgaste depende principalmente da dureza dos produtos de reação em comparação com a dureza da ferramenta de corte. A diminuição do desgaste é possível quando adicionado um revestimento na ferramenta, reduzindo a interação química da ferramenta com a peça, assim, reduzindo a adesão.

2.4.1.4 Difusão

A difusão é um processo ativado termicamente que envolve a movimentação de átomos individuais, influenciado pela temperatura. Este fenômeno pode reduzir a resistência ao desgaste da ferramenta de corte, seja por substâncias estranhas se difundindo nela ou por seus próprios componentes se difundindo para fora.

Na usinagem, átomos das áreas sujeitas a altas pressões e temperaturas, podem se mover, resultando em uma pequena, mas mensurável, perda de material.

Mais significativamente, a difusão de elementos de liga essenciais da ferramenta pode reduzir sua dureza e resistência à abrasão. Esses processos são verificados, conforme Figura 8, em altas velocidades de corte, onde as temperaturas elevadas na zona de contato facilitam a difusão entre o material da ferramenta e o material da peça, levando a uma interação a nível atômico e diferenças de concentração devido às composições distintas dos materiais envolvidos. (KLOCKE, 2018).

2.4.2 Tipos de desgastes em brocas helicoidais

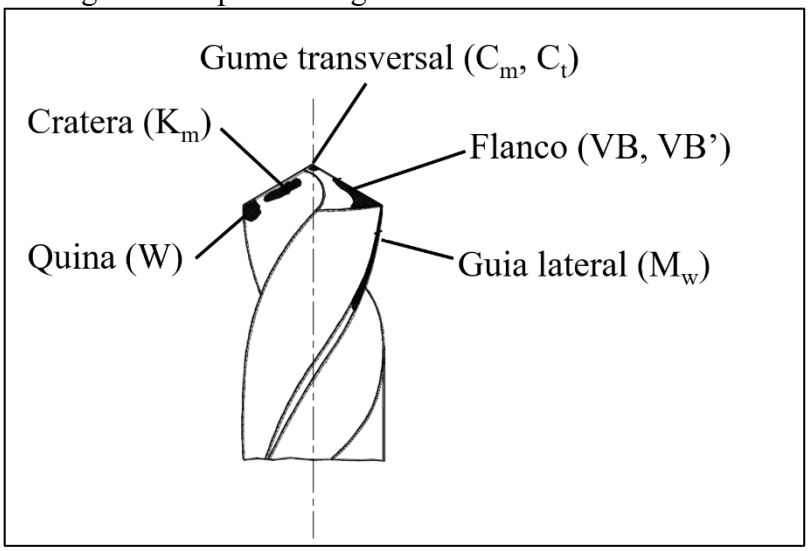
Os mecanismos de desgaste observados devidos aos esforços mecânicos dos processos de usinagem, resultam em diferentes formas de desgastes. Os principais tipos de desgaste em ferramentas de usinagem são o desgaste de cratera (KT) e desgaste do flanco principal (VB) e secundário.

O desgaste de cratera (KT) é causado na face de saída da ferramenta em decorrência do atrito da mesma com o cavaco. O colapso da ferramenta pose se dar pela cratera, marca de desgaste ou combinação de ambos.

O desgaste do flanco (VB) é a faixa desgastada no flanco da ferramenta. Dependendo das solicitações de corte entre material a ser usinado e material da ferramenta de corte, o desgaste do flanco pode ter seu máximo na periferia da zona de contato da ferramenta que se desloca na direção do cavaco. Esse desgaste surge na zona de contato da ferramenta-cavaco devido a solicitações térmicas e mecânicas, do caráter abrasivo e da quina afiada do lado inferior do cavaco, assim como do contato direto com a atmosfera. (KONIG e KLOCKE, 1997).

No processo de furação, há algumas particularidades em relação aos tipos de desgaste nas brocas helicoidais, além do desgaste da face e do flanco, apresenta-se o desgaste do gume transversal (C_m e C_t), na quina (W) e nas guias laterais (M_w), conforme mostra a Figura 9.

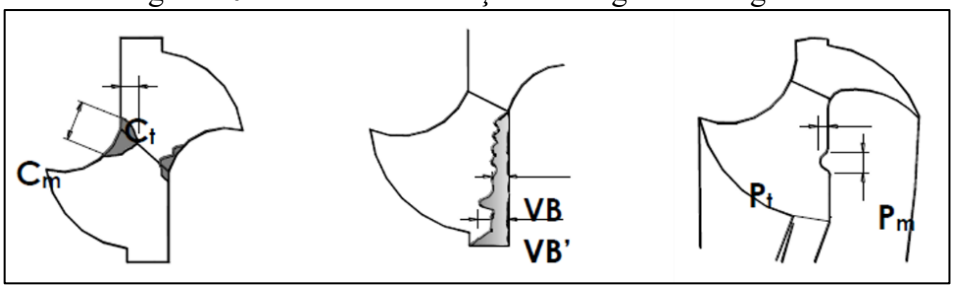
Figura 9 - Tipos de desgastes em uma broca helicoidal



Fonte: Adaptado de Brinksmeier (1990) e Castillo (2005).

Em relação ao desgaste do gume transversal, pode ser medido em relação à altura (C_t) ou em relação a largura (C_m). Já em relação ao desgaste de flanco, pode-se verificar o desgaste no ponto médio (VB) ou desgaste no ponto máximo (VB'). Por fim, pode-se ainda medir a altura (P_t) e a largura (P_m) do lascamento dos gumes de corte. Conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Formas de medição de desgastes nos gumes

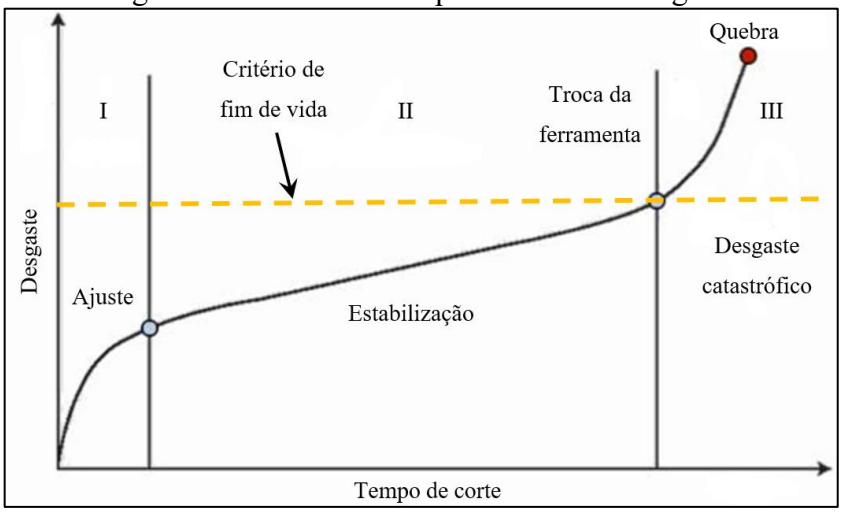


Fonte: Adaptado de Castillo (2005).

2.4.3 Comportamento do desgaste

Em geral, na usinagem, as ferramentas apresentam uma curva padrão de comportamento do desgaste. A Figura 11 ilustra essa curva.

Figura 11 - Curva de comportamento do desgaste



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015).

A curva mostra a evolução do desgaste em três estágios. No Estágio I, ocorre no início do processo de corte. Nesta fase, a ferramenta passa por um desgaste acelerado, que é um ajuste natural ao sistema tribológico envolvido. É como se a cunha de corte estivesse se assentando ao processo. Ao final desse estágio, então, a taxa de desgaste vai ficando cada vez menor e ocorre uma primeira inflexão na curva de desgaste. O estágio II, caracteriza-se por apresentar uma taxa constante de desgaste da ferramenta, ou seja, uma estabilização do desgaste. Isso significa que a ferramenta está ajustada ao processo e os mecanismos de desgaste funcionam a uma taxa estável, até que inicia uma nova inflexão na curva. Já o Estágio III, marca o início de uma aceleração do desgaste da ferramenta, com aumento rápido da taxa de desgaste. Mantendo-se o processo de corte durante esse estágio, a ferramenta pode quebrar em pouco tempo. Esse colapso da ferramenta ocorre devido ao fato de que o desgaste atingiu níveis elevados de temperatura e tensão (MACHADO et al., 2015).

De acordo com Machado at al. (2015), é importante observar atentamente e entender a evolução dessa curva, para assim evitar que a ferramenta chegue ao estágio III, pois nesse estágio, geralmente, a quebra da ferramenta ocorre em um tempo curto, tornando-se assim difícil de evita-la, representando custos mais elevados ao serviço.

Os resultados de testes e análises adequadas da curva de comportamento do desgaste podem contribuir para definição de critérios de fim de vida das ferramentas e também na definição de parâmetros do processo de usinagem, que juntos formam a curva de vida da ferramenta (KLOCKE, 2011).

2.4.4 Determinação do fim de vida da ferramenta

Para descrever o comportamento do material usinado e do material da ferramenta de corte durante a usinagem foi introduzido o conceito de vida da ferramenta, que é a capacidade de uma ferramenta suportar, de forma efetiva, um determinado processo de corte antes de ser reafiada ou substituída. Dessa forma, um critério deve ser adotado para determinar o fim de vida da ferramenta, com o objetivo de manter o processo produtivo e dentro de condições econômicas adequadas (MACHADO et al., 2015, KLOCKE, 2018).

Diversas variáveis são influenciadas pela vida da ferramenta e estão presentes durante todo o processo de usinagem. São constituídas por vários componentes envolvidos como: a ferramenta, peça de trabalho, máquina-ferramenta, processo e ambiente de corte (KLOCKE, 2018).

Por questões econômicas, o ideal é utilizar um sistema de monitoramento que determine, com segurança, o momento de troca da ferramenta, evitando trocas prematuras ou tardias. Os componentes da força de usinagem, a potência do motor, a temperatura de corte, a vibração do sistema e a emissão acústica são indicados, a partir de um controle adequado, para observar o momento de troca da ferramenta. De acordo com a Norma ISO 3685, desgaste de flanco médio (VB_B), desgaste de flanco máximo ($VB_{Máx}$), profundidade de cratera (KT), desgaste de entalhe (VB_N) e falha catastrófica também são recomentados para utilização como critério de fim de vida da ferramenta. Já em operações de acabamento, a norma recomenda, a utilização de critérios baseados em parâmetros de rugosidade superficial. (MACHADO et al., 2015).

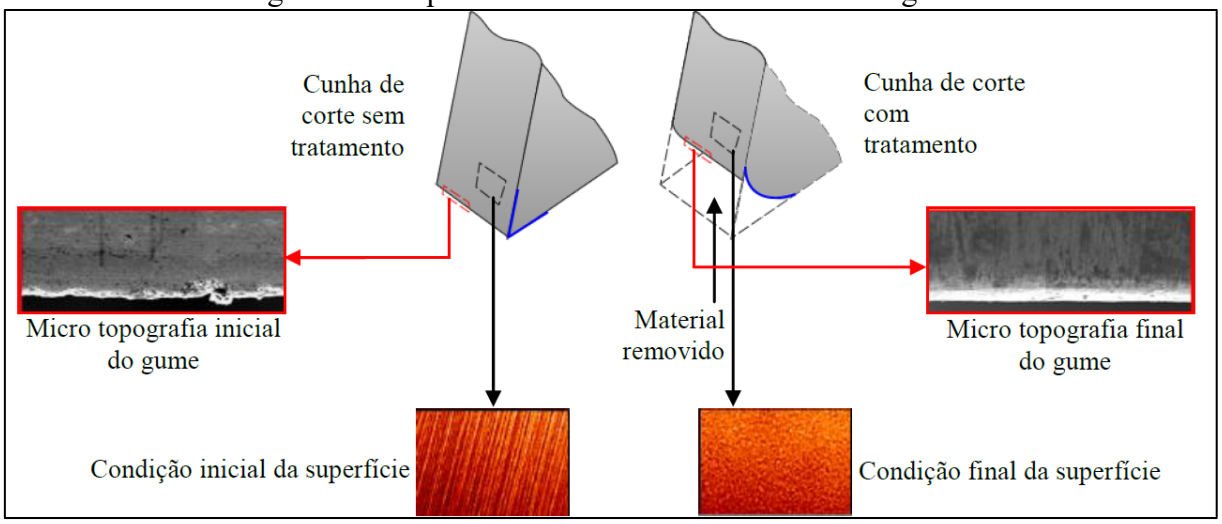
Ainda de acordo com Machado et al. (2015), na indústria, os parâmetros podem variar devido a vários fatores, que diferem de uma indústria para outra. Uma prática comum é usar a ferramenta de corte até que as peças produzidas alcancem uma faixa de tolerância e acabamento estabelecida para a usinagem, mas ainda estejam dentro das especificações de projeto. No entanto, continuar utilizando uma ferramenta de corte muito desgastada é arriscado, pois o desgaste excessivo aumenta as forças de usinagem e a geração de calor, elevando a probabilidade de uma falha catastrófica.

2.5 PROCESSO DE PREPARAÇÃO DO GUME

O tratamento de gumes consiste em gerar uma geometria no gume e modificar a microtopografia, como também alterar a rugosidade e a textura das superfícies da ferramenta

(face e flanco) na cunha de corte. Como resultado desse processo, há uma diminuição de defeitos no gume, melhorando o desempenho e confiabilidade da ferramenta de corte, além de aumentar a qualidade da peça usinada (RODRIGUEZ,2009; TIKAL, 2009; DENKENA e BIERMANN, 2014; WANG et al., 2020). A Figura 12, de forma simplificada, demonstra os aspectos e benefícios do tratamento de gume.

Figura 12 - Aspectos e benefícios do tratamento de gume



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2009) e Bordin (2013).

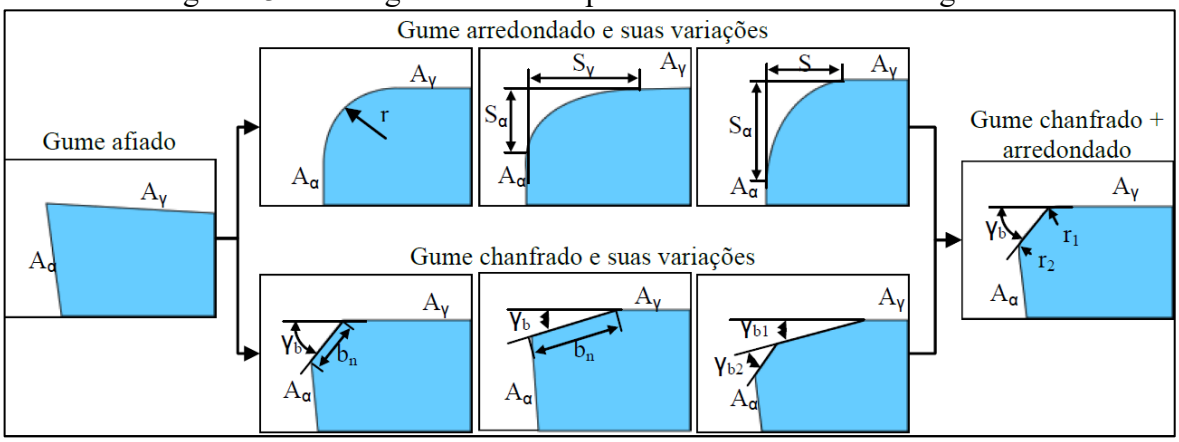
Complementando, o principal objetivo do tratamento é desenvolver no gume um arredondamento ou um chanfro, bem como uma combinação de ambos, para alcançar os seguintes propósitos: estabilização do gume, redução de lascamento do gume e melhoria da microestruturação, rugosidade superficial e superfícies abertas (TIKAL, 2009; KLOCKE, 2018; WANG et al., 2020). Além disso, pode-se afirmar que o tratamento do gume auxilia na preparação da ferramenta para aplicação de revestimentos, influência nas forças de corte, formação do cavaco, desgaste e vida útil da ferramenta (RODRIGUEZ, 2009; FULEMOVA e JANDA, 2014; KLOCKE, 2018).

Diversos parâmetros devem ser levados em conta durante a escolha da geometria mais adequada para a aplicação desejada. De acordo com Rodriguez (2009), os principais parâmetros são: condição inicial do gume, processo de usinagem, parâmetros do processo de usinagem, material da peça, material da ferramenta, macrogeometria da ferramenta e revestimento.

Outro parâmetro importante durante o processo de tratamento do gume é a caracterização adequada da microgeometria, que conforme mencionado anteriormente, pode ser chanfrada, arredondada ou uma combinação de ambos. A partir dessas formas, outras podem

ser geradas (RODRIGUEZ, 2009; KLOCKE, 2018). A Figura 13 mostra as microgeometrias que podem ser geradas no processo de tratamento do gume.

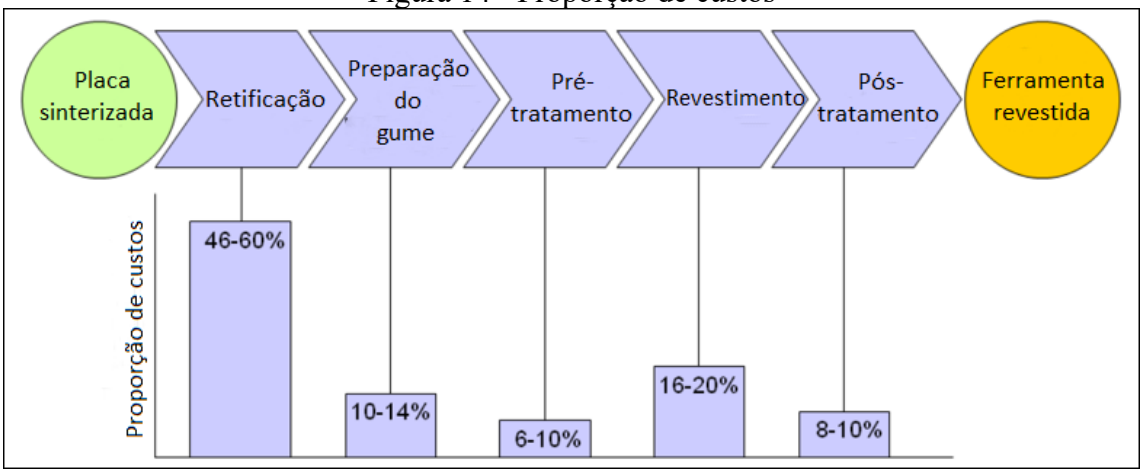
Figura 13 - Microgeometrias dos processos de tratamento de gumes



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2009) e Bordin (2013).

A aplicação de uma preparação adequada no gume, através de um tratamento planejado, reproduzível e controlável, permite alcançar altos ganhos econômicos em comparação com os custos da preparação do gume (TIKAL, 2009; BAUER, 2015). A Figura 14 mostra os custos proporcionais na fabricação de ferramentas de corte.

Figura 14 - Proporção de custos



Fonte: Adaptado de Bauer (2015).

Os custos de tratamento do gume representam entre 10% e 14% dos custos de fabricação. Em geral, a aplicação da preparação do gume implica em custos adicionais ao fabricante devido às máquinas, custos de energia, manutenção, além de outros custos adicionais.

Consequentemente, também há um aumento de custo por ferramenta, em troca de um aumento de vida útil, redução de custos de armazenamento e aumento da confiabilidade (BAUER, 2015).

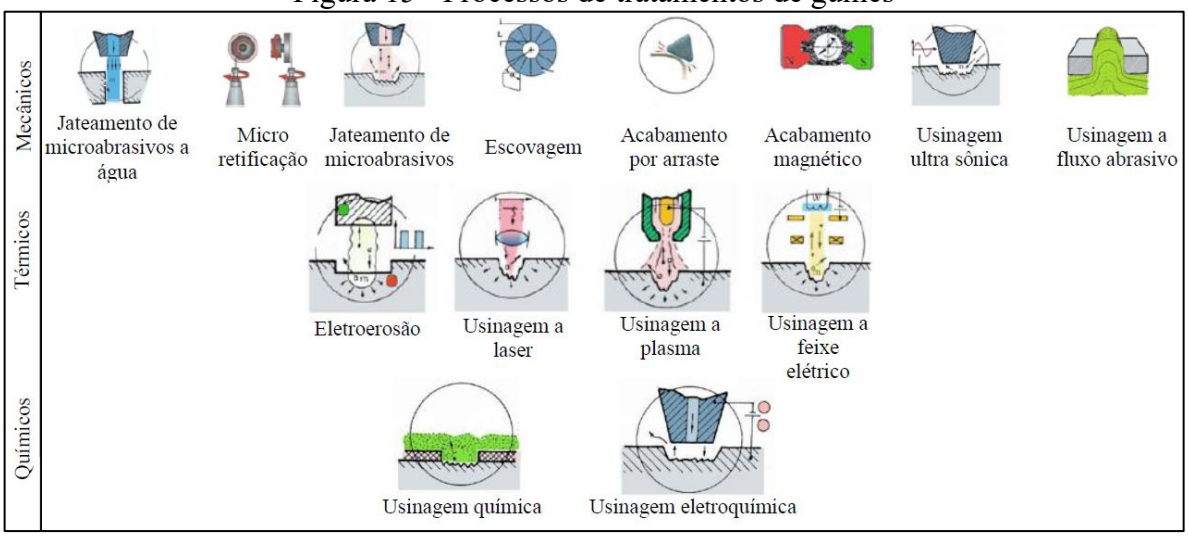
No que diz respeito ao aumento de vida útil da ferramenta, testes nesse contexto mostram a magnitude da melhoria. No torneamento, o aumento de vida da ferramenta foi de aproximadamente 200% (RODRIGUEZ, 2009). Utilizando diferentes métodos de tratamento em diferentes tipos de ferramentas, obteve-se ganhos de 39% a até 167% (WANG et al., 2020). No processo de furação, com a preparação do gume adequada, houve aumento de mais de 300% da vida útil em comparação com uma ferramenta sem tratamento (BIERMANN e TERWEY, 2008). Estudos como estes justificam os gastos com tratamentos de gumes.

2.5.1 Processos de tratamento de gumes

Os processos de tratamento de gumes têm o objetivo de remover material para alcançar a geometria específica do gume e topografia necessária, além de modificação das superfícies conectadas nas redondezas do gume. Esses processos devem atender, principalmente, precisão e repetição.

Há diferentes possibilidades tecnológicas para realizar a preparação do gume de ferramentas de corte com precisão. Os processos considerados utilizam diferentes fontes de energia para a remoção do material. Dentre cada fonte de energia utilizada, os processos podem ser agrupados em: processos mecânicos, térmicos e químicos (RODRIGUEZ, 2009). A Figura 15 mostra os diferentes processos de tratamento de gume em cada tipo de energia utilizada para a remoção.

Figura 15 - Processos de tratamentos de gumes



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2009) e Bordin (2013).

De acordo com Denkena e Biermann (2014), os processos mais comuns na indústria são: jateamento com microabrasivos úmidos ou secos, escovagem e o acabamento por arraste.

No que diz respeito ao desempenho, bem como à precisão, os processos podem ser aplicados nos mais variados modelos de ferramentas, sem que haja grande diferenciação, porém, cada processo tem suas particularidade e dificuldades que devem ser considerados de acordo com a microgeometria desejada.

Referente a tratamentos de gumes em brocas helicoidais, há poucos estudos apontando os efeitos da alteração da microgeometria. Dessa forma, nota-se a oportunidade e necessidade de estudos mais detalhados sobre os efeitos do tratamento do gume em brocas helicoidais.

No presente trabalho, baseando-se na carência de informações, disponibilidade de equipamentos, facilidade e custo de aplicação, foram escolhidos os processos de escovagem com escovas de naylon abrasivo e o processo de acabamento por arraste.

2.5.1.1 Tratamento de escovagem

O tratamento de escovagem é um processo amplamente utilizado na indústria para preparar os gumes das ferramentas de corte. As razões que podem justificar a utilização do processo são a robustez e os custos relativamente baixos do sistema e dos materiais de desgaste (KLOCKE, 2018).

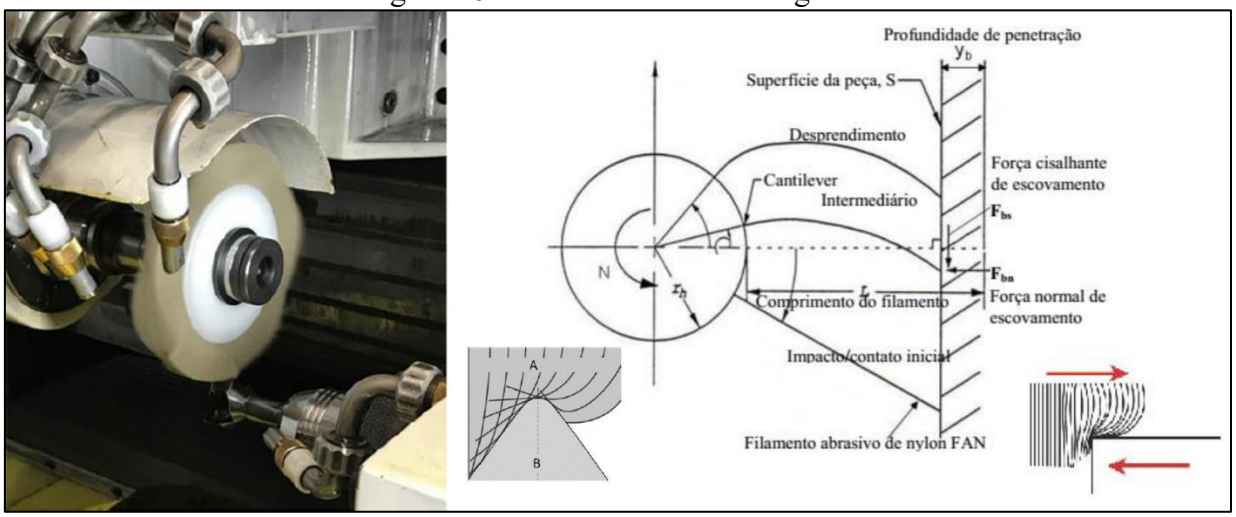
Para o tratamento, geralmente, são utilizadas escovas periféricas na forma de rodas ou escovas de discos. As escovas abrasivas são fabricadas com cerdas ou filamentos de fibras poliméricas, como o nylon, nos quais é incorporado um meio abrasivo, normalmente os mais comuns são: carboneto de silício (SiC), óxido de alumínio (Al2O3) ou diamante policristalino (PCD) (DENKENA e BIERMANN, 2014; KLOCKE, 2018). A Figura 16 demonstra o tratamento por escovagem.

Diversas variáveis influenciam no tratamento de escovagem, entre os principais fatores, pode-se citar os parâmetros do processo (velocidade de rotação, avanço e tempo de contato) e os parâmetros da escova (tamanho e material do grão abrasivo) (DENKENA, BIERMANN, 2014; KLOCKE, 2018).

O tratamento caracteriza-se pela capacidade em um curto tempo de processamento, a partir de uma configuração adequada, de produzir raios de 0,2 mm até raios significativamente maiores, devido a altas taxas de remoção de material. No entanto é fundamental a compreensão

das interações com o substrato e desgaste dos filamentos abrasivos (DENKENA e BIERMANN, 2014; KLOCKE, 2018).

Figura 16 - Tratamento de escovagem



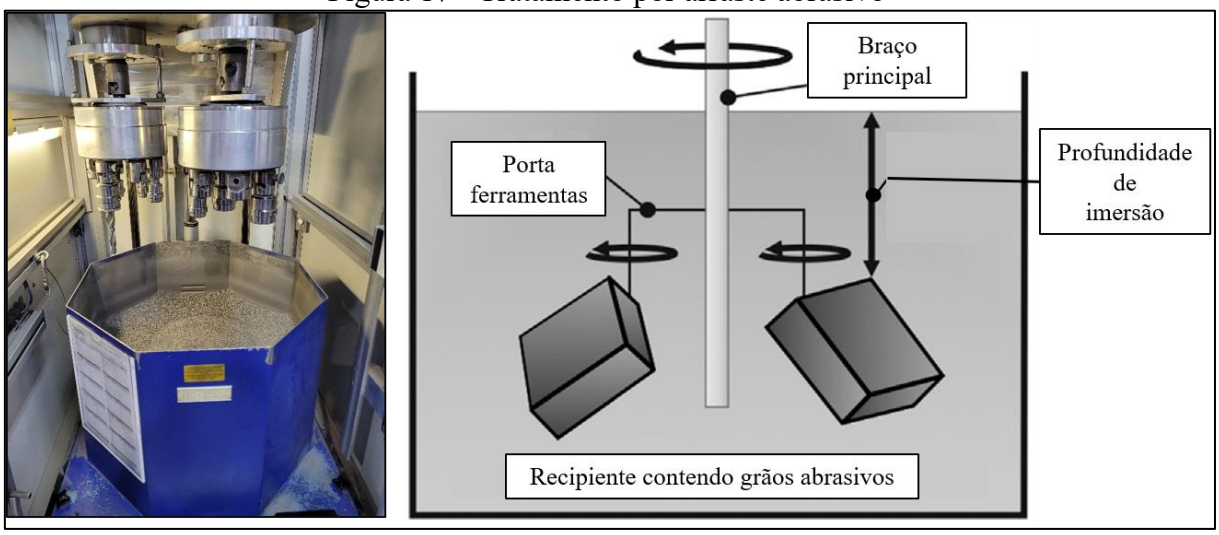
Fonte: Adaptado Tikal (2009) e Wang et al. (2020).

Uma das desvantagens no processo de escovagem reside nas grandes tolerâncias devido ao desgaste da escova. O controle do processo também é difícil devido ao monitoramento insuficiente do desgaste das escovas. Dependendo da velocidade de corte, o desgaste pode ocorrer de diferentes formas, enquanto em baixas velocidades pode-se observar a acumulação dos grãos abrasivos na ferramenta, com velocidades maiores, pode-se notar a adesão do nylon à superfície da ferramenta. Além disso, efetuando o processo a seco, a aplicação do filamento de nylon fundido pode ocorrer por causa do calor, por esta razão, muitos processos de escovagem são realizados a úmido (KLOCKE, 2018).

2.5.1.2 Tratamento por arraste abrasivo

O tratamento por arraste abrasivo trata-se de um processo de força e espaço limitado, utilizado para rebarbar, arredondar gumes e melhorar as superfícies de ferramentas. A ferramenta é mergulhada em um recipiente contendo grãos abrasivos, que geralmente consiste em partículas ligadas a plásticos e cerâmicas, carboneto de silício, óxido de alumínio, quartzo ou cascas de nozes. Após a imersão, a ferramenta gira através de um braço principal e braços satélites, dessa fora, as partículas do meio abrasivo saltam e se arrastam ao longo da superfície da ferramenta, removendo o material (DENKENA e BIERMANN, 2014; KLOCKE, 2018). A Figura 17 apresenta uma visão esquemática do processo.

Figura 17 - Tratamento por arraste abrasivo



Fonte: Adaptado de Denkena e Biermann (2014).

A taxa de remoção do material pode ser influenciada por diferentes parâmetros, como mais relevantes pode-se citar: a velocidade de rotação do eixo principal e do eixo satélite, tempo de processamento, mídia abrasiva, profundidade de imersão e direção de rotação (DENKENA e BIERMANN, 2014; KLOCKE, 2018).

O tratamento por arraste é altamente personalizável devido aos vários parâmetros do processo. Com base em uma configuração adaptada, os raios dos gumes podem ser produzidos de forma reprodutível e a rugosidade do gume pode ser significativamente reduzida.

O processo de acabamento pode ser utilizado tanto para ferramentas com haste como para pastilhas intercambiáveis. Além disso, podem ser preparadas várias ferramentas ao mesmo tempo. No entanto, o tamanho máximo de arredondamento que pode ser produzido é limitado, devido ao aumento do tempo de processo, raios maiores que 40 µm podem não ser economicamente produzíveis. Outra desvantagem é que raios assimétricos não podem ser reproduzidos ou só podem ser produzidos com insuficiente reprodutibilidade (KLOCKE, 2018).

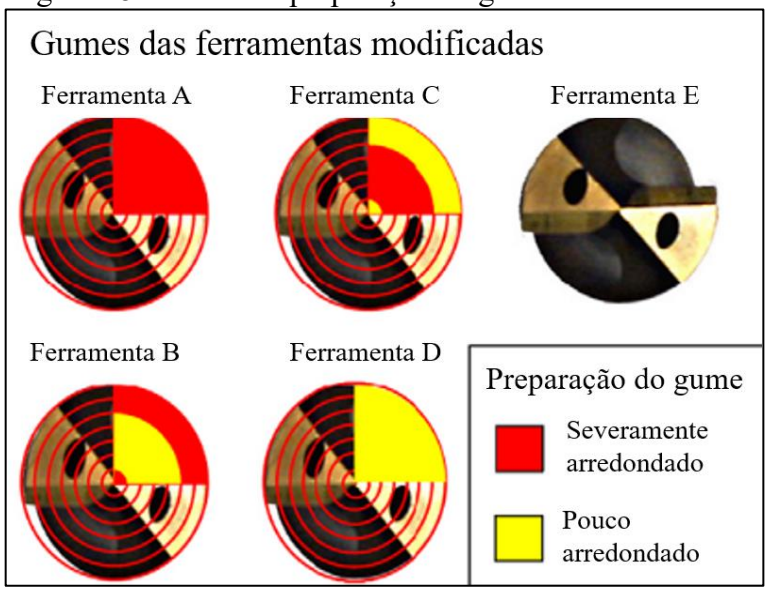
2.5.2 Influência dos tratamentos de gumes no desgaste da ferramenta

Denkena e Biermann (2014) apresentaram vários benefícios e aspectos relacionados aos tipos de tratamento de gume e suas implicações em alguns tópicos da usinagem como o comportamento do desgaste, formação do cavaco, temperatura da ferramenta, forças de usinagem e integridade superficial do conjunto peça-ferramenta.

Li et al (2022) demonstraram o estado da arte em relação ao desempenho de corte e integridade superficial considerando a microgeometria do gume de ferramentas para o processo de corte no metal. Já Zhou et al (2023) apresentaram uma revisão de estudos relacionados aos métodos de preparação de gumes em ferramentas de corte. Ambos os trabalhos destacam os métodos de tratamento de gumes, os cuidados e vantagens durante as aplicações através de estudos relacionados a área, além da importância de estudos contínuos nesse tema.

Em relação ao processo de furação, Biermann e Terwey (2008), analisaram o efeito de diferentes preparações de gume através do tratamento por jateamento úmido na furação. A Figura 18 mostras e ferramentas utilizadas. As ferramentas A e D possuem gume uniforme, já as ferramentas B e C o gume não é uniforme. A ferramenta E não possuem tratamento de gume e é utilizada como referência.

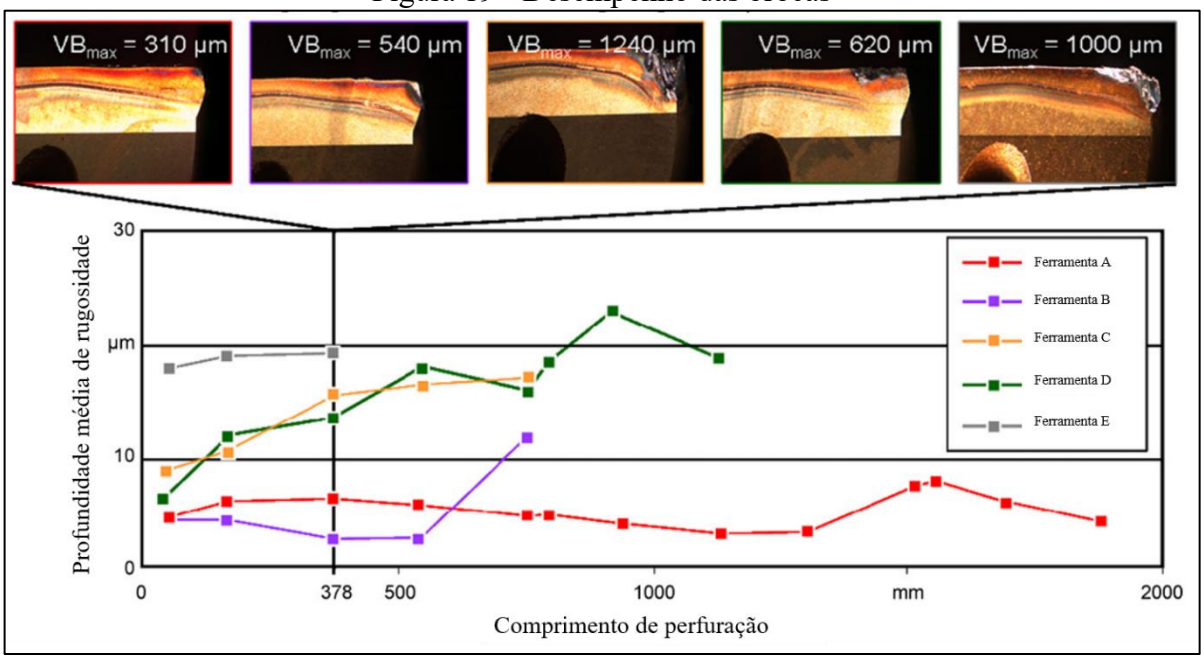
Figura 18 - Forma de preparação do gume das ferramentas



Fonte: Adaptado de Biermann e Terwey (2008).

Como resultado, mostrou-se um menor desgaste de flanco nas brocas tratadas e com gumes uniformes, com destaque para a broca A. Entretando, o tratamento de gume resultou em um aumento das forças envolvidas no processo de furação, que pode ser explicada pelo fato de que, com o aumento do raio da ferramenta, o gume fica menos afiado, exigindo maiores esforços mecânicos do conjunto máquina-ferramenta. A Figura 19 apresenta o desempenho das ferramentas.

Figura 19 - Desempenho das brocas

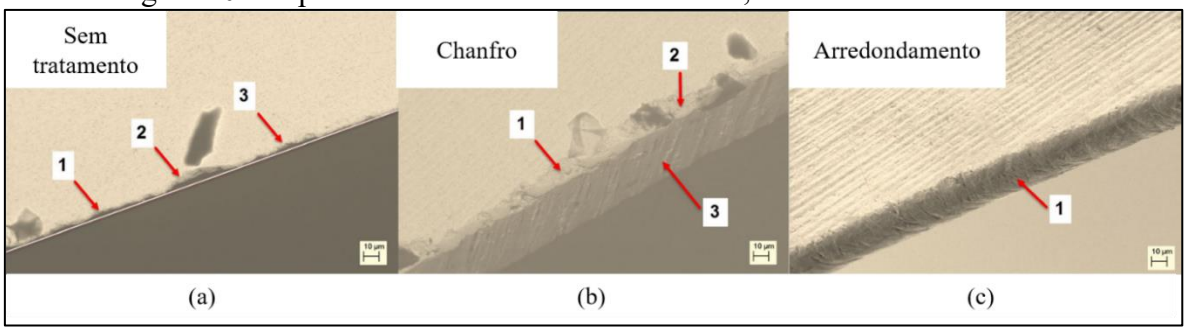


Fonte: Adaptado de Biermann e Terwey (2008).

Biermann et al (2012) pesquisaram a influência da preparação do gume em brocas profundas. Diferentes graus de arredondamentos foram utilizados nos experimentos. Os resultados mostram que a preparação do gume leva a uma maior vida útil da ferramenta, devido ao aumento da estabilidade do gume, no entanto há um aumento de carga mecânica devido ao arredondamento do gume, aumentando levemente a rugosidade. Outras características da qualidade do furo, como o diâmetro e o desvio de circularidade também são influenciadas positivamente pelo tratamento de gume.

Santana e Polli (2022) apresentaram o efeito da preparação do gume através de um chanfro e um arredondamento na vida útil de brocas para a furação do aço SAE4144M. A Figura 20 apresenta a superfície do gume sem tratamento (a), com tratamento através de um chanfro (b) e com tratamento através de um arredondamento (c). Nota-se que o gume sem tratamento apresenta irregularidades nas regiões 1, 2 e 3, que podem ser prejudiciais causando danos na ferramenta. No gume com chanfro também se constatou irregularidades nas regiões 1 e 2, menores ao comparar com a ferramenta sem tratamento, entretanto, por serem na região cortante da ferramenta, podem afetar negativamente o desempenho da ferramenta. Já o gume com o arredondamento não apresentou defeitos.

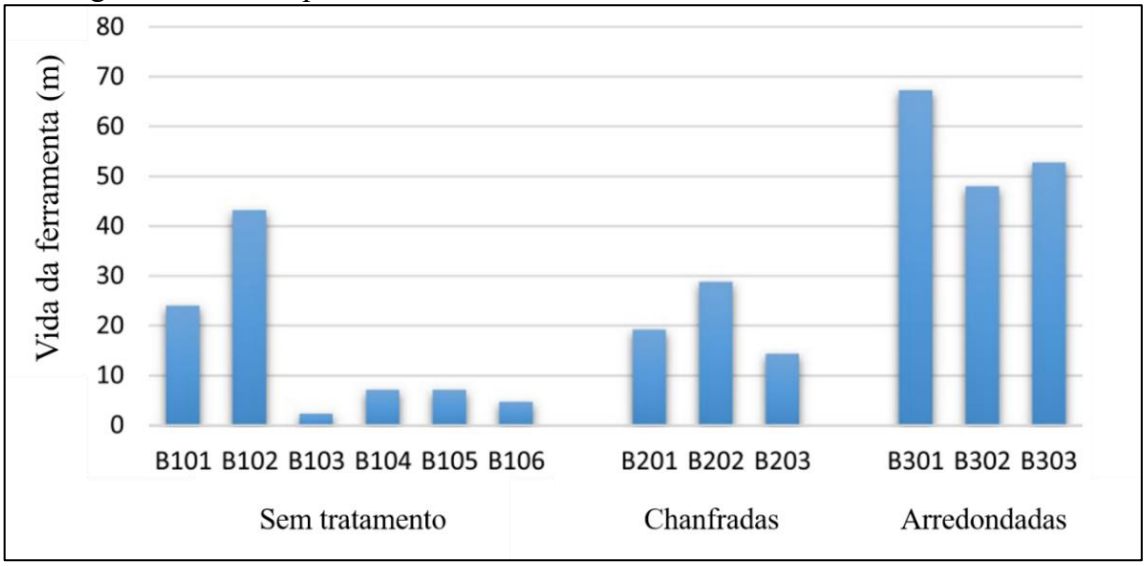
Figura 20 - Superfície das brocas sem tratamento, chanfradas e arredondadas



Fonte: Adaptado de Santana e Polli (2022).

Em relação ao desgaste das ferramentas, as brocas sem preparação de gume apresentaram um comportamento de desgaste imprevisível e apresentaram falhas no estágio inicial da usinagem. Brocas com gumes chanfrados ou arredondados apresentaram menores desgaste, com destaque as brocas de gume arredondado que apresentarem melhores resultados em termos de vida útil, obtendo o dobro de vida útil em comparação as brocas com o gume chanfrado e até 5 vezes a vida útil das brocas sem tratamento, conforme é mostrado na Figura 21, onde as brocas B101 à B106 indicam as brocas sem tratamento de gume, as brocas B201 à B203 indicam as brocas chanfradas e as brocas B301 à B303 apontam as brocas com gume arredondado.

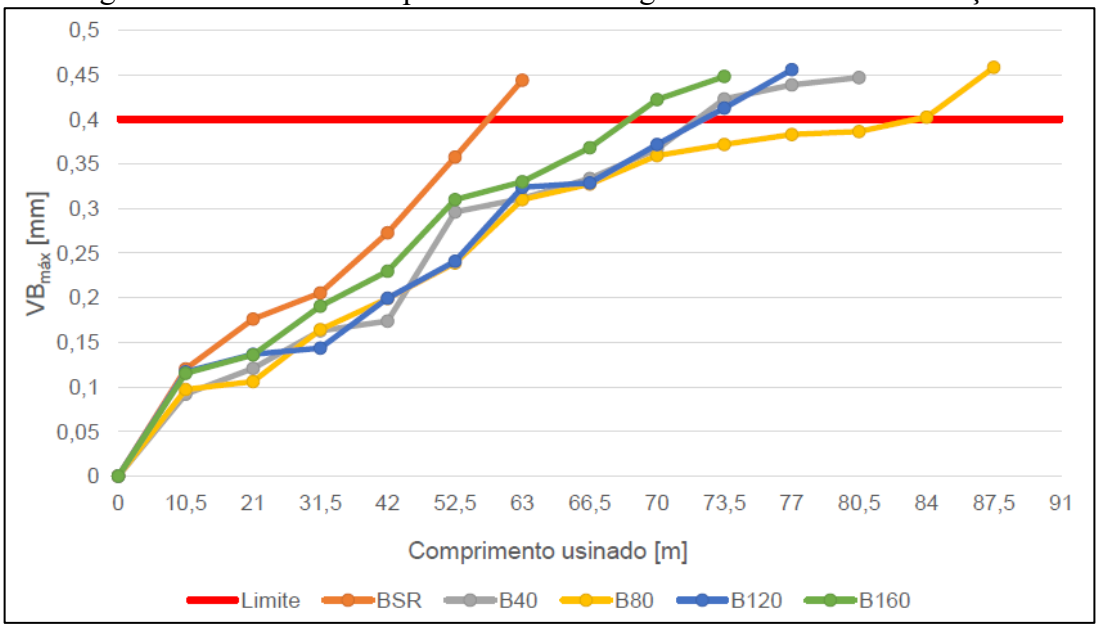
Figura 21 - Desempenho das brocas sem tratamento, chanfradas e arredondadas



Fonte: Adaptado de Santana e Polli (2022).

No processo de furação em ferro fundido, Barbosa (2021) estudou a influência do raio da aresta de corte na furação do ferro fundido vermicular FV-450. Na pesquisa utilizou-se quatro brocas com raios 40 µm (B40), 80 µm (B80), 120 µm (B120) e 160 µm (B160), além de uma broca sem revestimento (BSR). Como resultado observou-se que a broca com raio de 80 µm apresentou um melhor desempenho em relação a vida útil, conforme gráfico da Figura 22.

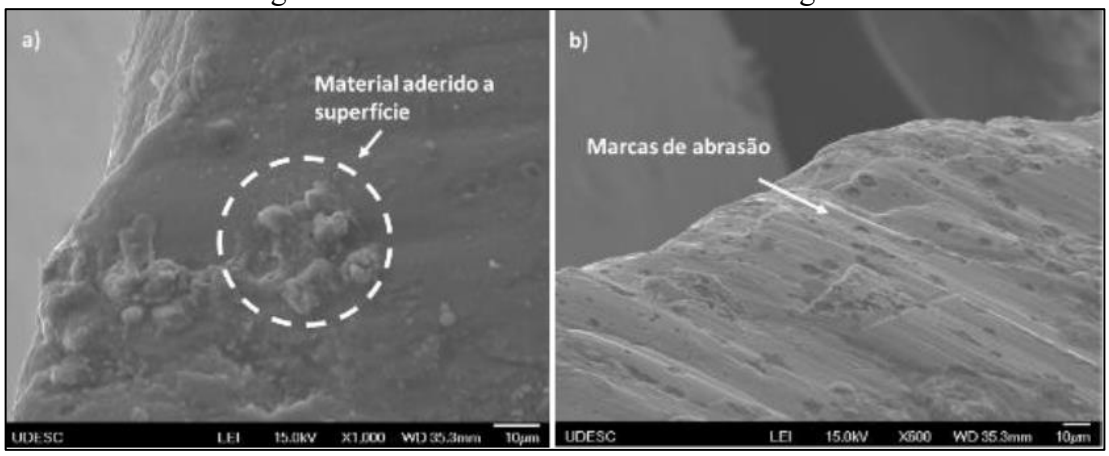
Figura 22 - Curva de comportamento do desgaste das diferentes condições



Fonte: Barbosa (2021).

Em relação aos mecanismos de desgaste, em todas as brocas, de forma predominante, notou-se os desgastes por adesão e abrasão, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 - Análise dos mecanismos de desgaste



Fonte: Barbosa (2021).

De acordo com o autor, o desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície de dureza mais elevada entra em contato com uma superfície de menor dureza, formando sulcos e ranhuras. Neste caso os sulcos formados no sentido do movimento de corte são resultado do atrito entre a ferramenta, a superfície da peça e o do cavaco gerado durante o processo de usinagem. Já o desgaste por adesão pode ser caracterizado como pequenas partículas do material da peça aderidas na superfície da ferramenta, geradas devido a ação de forças excessivas obtidas pela interação do material da peça e a ferramenta de corte.

Um número considerável de estudos demonstra que a modificação na microgeometria do gume, através de um raio e/ou chanfro, pode oferecer consideráveis melhorias à ferramenta e influenciar significativamente na vida útil, controlando e prorrogando o desgaste. Da mesma forma, apresentam diferentes estratégias e parâmetros para a definição dos processos de tratamento de gume, além dos efeitos das aplicações dos mesmos, que contribuem e servem como base para novos estudos. Entretanto, nota-se uma lacuna e necessidade de mais pesquisas na área de tratamento de gumes no processo de furação, em razão da variedade de ferramentas, aplicações e demais elementos que influenciam no processo.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo é apresentado, de forma detalhada, a metodologia utilizada neste trabalho. Será descrito a motivação do trabalho, todo o planejamento experimental para a execução dos testes de tratamento de gume e testes de usinagem, incluindo materiais, ferramentas, equipamentos e processos que serão utilizados para avaliação dos resultados.

3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E MÉTODO DA PESQUISA

Em vista da importância de desenvolver melhorias no processo de furação de ferro fundido, busca-se explorar o cenário de preparação do gume em brocas helicoidais utilizando diferentes processos. Por ser uma área com grande potencial, nota-se uma oportunidade para trazer desenvolvimentos nessa área que ainda é pouco explorada, analisando e entendendo, o efeito de diferentes tratamentos e condições empregadas, no desempenho das ferramentas.

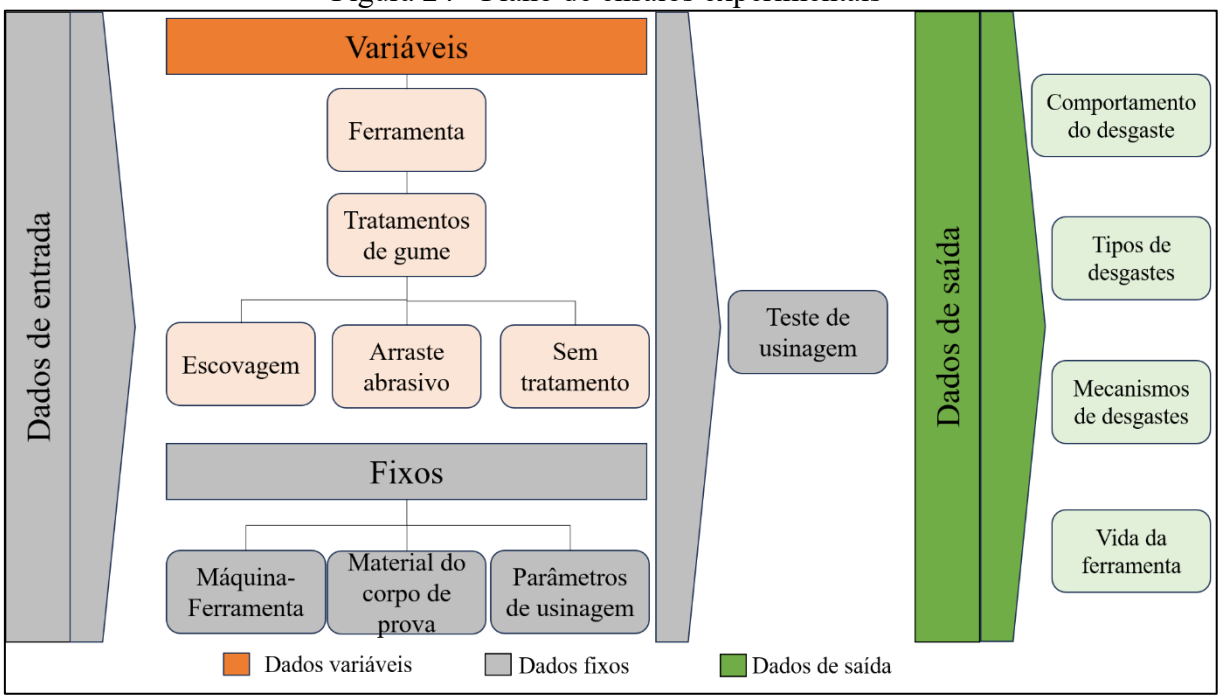
Considerando que a vida útil da ferramenta é afetada diretamente pelo desgaste do gume principal, para cumprir os objetivos deste trabalho, o método consiste em testar brocas helicoidais para a usinagem de ferro fundido nodular aplicando dois tratamentos de gumes diferentes: o arraste abrasivo, processo já utilizado atualmente na fabricação das brocas e o processo de escovamento, com o intuito de investigar os efeitos desses tratamentos em termos do desgaste das ferramentas, identificando o que apresenta o melhor desempenho. Além disso, em uma broca não realizou-se o tratamento de gume.

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para os ensaios experimentais do processo de furação da peça em ferro fundido, como variáveis de entrada, gerou-se quatro microgeometrias nos gumes através do processo de escovagem e quatro microgeometrias através do processo de arraste abrasivo, além disso, em uma broca não realizou-se tratamento de gume. Como variáveis de saída, será avaliado a vida útil da ferramenta, tipos e mecanismos de desgaste

O plano de ensaio experimental pode ser observado no fluxograma da Figura 24. Nele está compreendido os dados de entrada e de saída que foram definidas e avaliadas, compreendendo as variáveis modificadas durante os testes e os parâmetros fixos previamente determinados.

Figura 24 - Plano de ensaios experimentais



Fonte: Autor (2025).

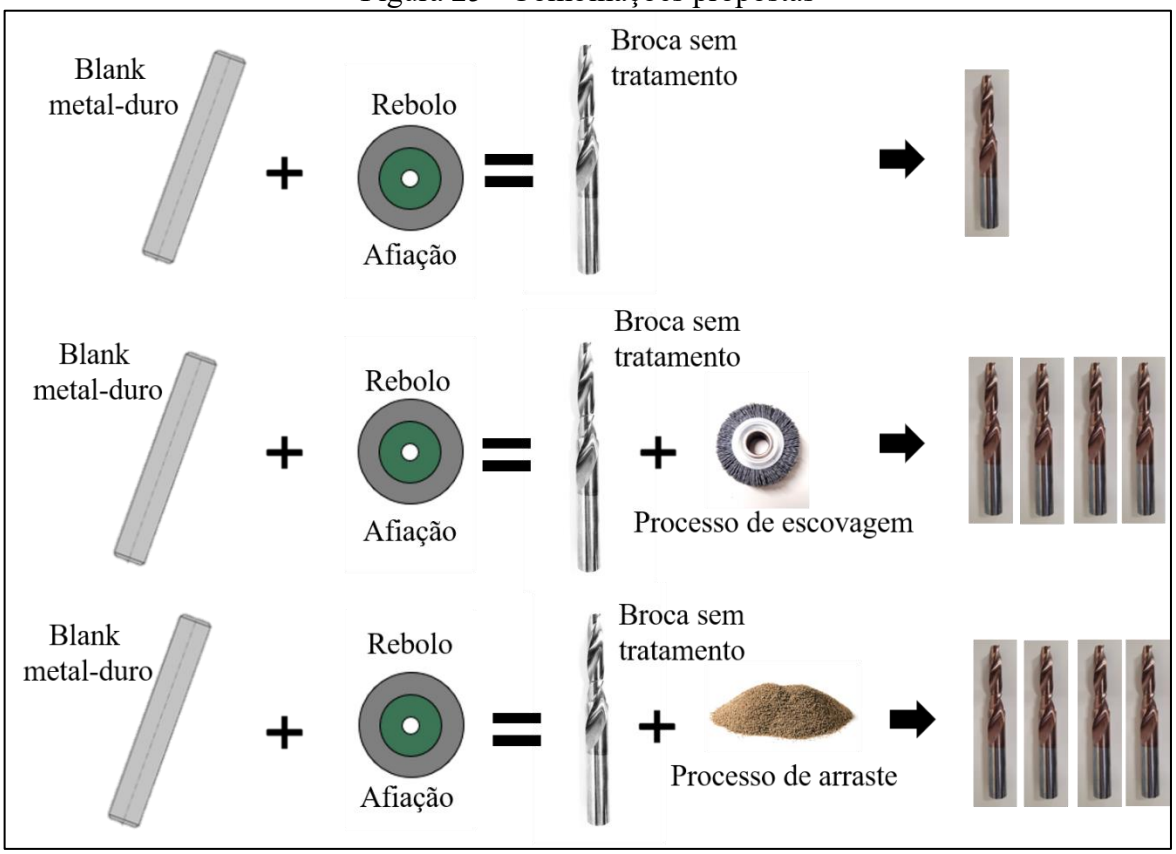
Como este trabalho busca avaliar apenas a influência de diferentes métodos de preparação do gume no comportamento do desgaste e a vida da ferramenta, demais parâmetros, como: macrogeometria e revestimento da ferramenta, material do corpo de prova, condições de lubrirrefrigeração e parâmetros de corte do processo de usinagem não foram modificados.

3.2.1 Variáveis de entrada

O objetivo do trabalho é investigar a influência dos tratamentos de gume e da modificação na microgeometria dos gumes sobre o desgaste da ferramenta de corte para o processo de furação. Assim, as variáveis de entrada são os tipos de tratamento de gume e a microgeometria dos gumes.

Das nove brocas helicoidais escalonadas utilizadas, em uma não foi realizado tratamento de gume, em quatro aplicou-se o tratamento por escovagem utilizando escovas com filamentos de nylon abrasivos e em outras quatro aplicou-se o processo de arraste abrasivo utilizando granulado abrasivo em óxido de alumínio. A Figura 25 mostra as combinações propostas das ferramentas que serão utilizadas.

Figura 25 - Combinações propostas



Fonte: Autor (2025).

As quatro microgeometrias dos gumes geradas no processo de escovagem buscaram atender a um raio na faixa de 65 µm a 80 µm. Porém, devido a incompreensão da influência de cada variável, entre elas: velocidade de rotação, tempo de processo, profundidade de contado e desgaste da escova, foram aplicadas diferentes condições. A velocidade de rotação foi de 4.700 rpm, devido às limitações no equipamento, já o tempo de processo e profundidade de contato foram alterados.

Em relação as quatro microgeometrias obtidas no processo de acabamento por arraste, em uma aplicou-se as condições já realizadas pela empresa, com velocidade do rotor de 45 rpm e tempo de processo 8 minutos, nas outras três brocas aplicaram-se diferentes condições de velocidade e tempo de processo, também com o objetivo de entender melhor a influência de cada variável e obter a microgeometria do gume na faixa desejada.

3.2.2 Variáveis de saída

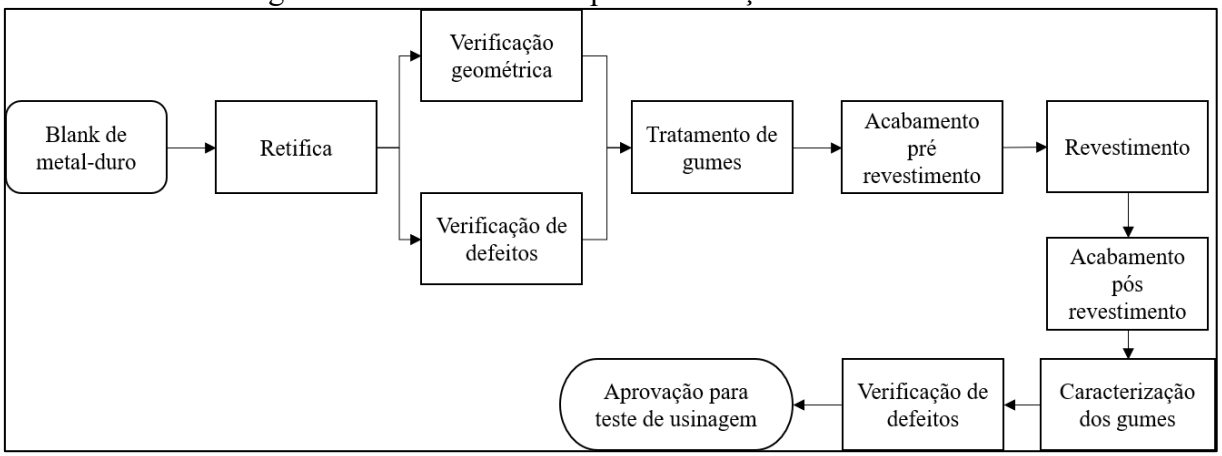
Como variável de saída, definiu-se o desempenho da ferramenta, baseando-se no o desgaste de flanco máximo ($VB_{Máx}$) após 4.800 furos.

Para analisar o comportamento do desgaste, visualizar os tipos de desgastes e verificar o surgimento de possíveis falhas que possam influenciar no desempenho da ferramenta, a cada 1.600 furos, o teste foi interrompido para efetuar a medição do desgaste e submeter as brocas a uma análise visual, através do estereoscópio ótico, capturando imagens com aumento de 15 vezes e 30 vezes. Também, ao término dos testes de usinagem, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV), capturou-se imagens com aumentos de até 10.000 vezes. Dessa forma, registrou-se imagens da superfície da ferramenta, onde é possível identificar os desgastes ocorridos durante os testes de usinagem.

3.2.3 Ferramenta

Neste trabalho, as brocas helicoidais escalonadas foram fornecidas pela Secta Tools Indústria de Ferramentas, com diâmetro 13,5x48mm e 15,98x62,1mm. O substrato destas ferramentas é K40UF, o tamanho de grão é de 0,65 µm, a dureza é de 1620 HV30, a densidade de 14,45 g/cm³ e sua composição é de 10% de cobalto e 90% de carboneto de tungstênio (KONRAD FRIEDRICHS, 2020). Historicamente, as ferramentas utilizadas neste processo realizam na faixa de 8.000 a 10.000 mil furações até alcançarem o fim o critério de fim de vida adotado pela empresa e passam por diversos procedimentos para sua fabricação. A Figura 26 apresenta um fluxograma com os procedimentos utilizados para a fabricação da ferramenta.

Figura 26 - Procedimentos para fabricação da ferramenta

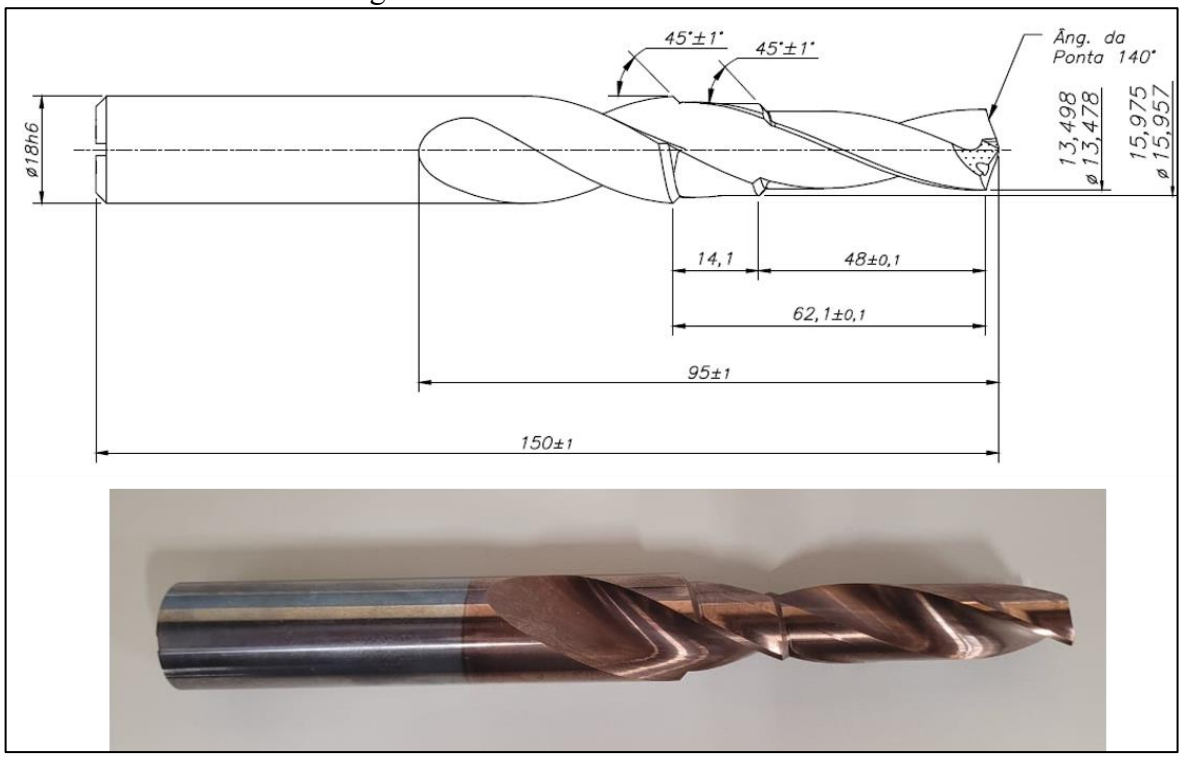


Fonte: Autor (2025).

Inicialmente, partindo do blank de metal-duro, a broca foi retificada nas dependências da Secta Tools utilizando uma retificadora CNC cilíndrica Fanuc 21i, com rebolo de desbaste de dureza média, tamanho de grão D46 e concentração C75. No acabamento, utilizou-se rebolo de dureza baixa, tamanho de grãos D15, concentração C50 e com refrigeração.

Atualmente, a ferramenta utilizada para a aplicação específica possui dimensões e geometria apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Geometria das ferramentas



Fonte: Secta (2025).

Após a retifica, uma verificação geométrica utilizando o equipamento Zoller Genius 3S foi realizada nas brocas helicoidais e posteriormente uma análise visual para a verificação de defeitos utilizando um estereoscópio ótico com ampliações de 15 vezes e 30 vezes.

Em seguida, as brocas foram submetidas aos tratamentos de escovagem e arraste abrasivo para a modificação da microgeometria do gume.

Oito ferramentas foram submetidas a processos para a modificação da microgeometria, as quais quatro ao processo de escovagem e quatro ao processo de arraste abrasivo. Em ambos os processos cada broca foi sujeita a uma condição específica. No tratamento de escovagem, definiu-se quatro condições variando a profundidade (Ap) e o tempo de contato (T) da escova. Já no processo de acabamento por arraste abrasivo, definiu-se quatro condições variando a velocidade (V) e o tempo de processo (T).

Ao término da preparação dos gumes, as brocas foram submetidas a um processo de polimento utilizando o equipamento OTEC DF-3, com a mídia abrasiva H4-400, que consiste em granulado de casca-de-noz impregnado com pasta de polimento, para proporcionar um melhor acabamento superficial na ferramenta, com o intuito de eliminar possíveis rebarbas provenientes da retificação ou dos processos de tratamentos de gume, além de contribuir na adesão do revestimento na ferramenta. Em seguida, revestiu-se a ferramenta com Balinit Durana, que consiste em nitreto de alumínio-titânio (AlTiN). Por fim, após o revestimento, as ferramentas novamente foram submetidas a um processo de polimento utilizando o mesmo equipamento OTEC DF-3 e mídia abrasiva HSC1/300, que consiste em granulado de moagem a seco, com o objetivo de eliminar qualquer partícula ou gota na superfície da ferramenta oriunda do processo de revestimento.

Antes da liberação das brocas para os testes de furação, os gumes foram caracterizados utilizando o microscópio Bruker Alicona, possibilitando o mesmo demarcar uma região que é possível medir 50 pontos diferentes do gume e assim fazer uma média do tamanho do raio, além disso, verificar a microgeometria formada. Por fim, uma nova análise visual utilizando o estereoscópio ótico foi realizada para verificar as condições das brocas e aprovar para início de testes.

3.2.4 Tratamento dos gumes

3.2.4.1 Tratamento de escovagem

O tratamento de escovagem foi realizado nas dependências da Secta Tools, utilizando uma escova com filamentos de nylon abrasivo de carboneto de silício (SiC) e malha abrasiva 120, fixada em uma Afiadora Universal Tacchella Modelo 4M com velocidade de rotação 4.700 rpm.

Inicialmente, posicionou-se a escova na retificadora, em seguida, a broca foi fixada de acordo com o ângulo de ponta da ferramenta, de modo que o gume e a escova estivessem paralelos, a Figura 28 mostra o processo. A aproximação e afastamento da ferramenta ocorreram de forma manual, expondo-se assim a pequenas discrepâncias entre tempo real de trabalho e o tempo medido.

Figura 28 - Tratamento de escovagem

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após cada condição aplicada, com o intuito de verificar se o raio do gume gerado se encontrava na faixa de tamanho pretendido, mediu-se o gume. Desta forma, algumas operações não se realizaram de forma contínua.

Durante o tratamento, observou-se que, devido ao desgaste da escova, o rendimento da escova estava diminuindo, assim, aplicou-se condições mais severas de tempo de processo e profundidade de contato. A Tabela 2 mostra as condições utilizadas em cada uma das brocas.

Tabela 2 - Condições do processo de escovagem

Condições	Ap - Profundidade de contato (mm)	T - Tempo de processo (s)
Broca 01	1	10
Broca 03	1	20
Broca 02	2	8
Broca 06	2	10

Fonte: Autor (2025).

3.2.4.2 Tratamento por arraste abrasivo

O processo por arraste abrasivo também se desenvolveu nas dependências da Secta Tools, utilizando equipamento OTEC DF-3 e granulado abrasivo em óxido de alumínio QZ 1-3, principalmente utilizado para os arredondamentos de gumes acima de 30 µm em ferramentas de metal-duro com tamanho de grãos de 1 mm a 3 mm (OTEC, 2024). A Figura 29 ilustra o processo.

Figura 29 - Tratamento por arraste abrasivo

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como parâmetros do processo, aplicou-se 4 condições diferentes nas 4 brocas helicoidais, variando velocidade de rotação e tempo de processo.

Na primeira broca foi utilizada a condição do processo atual de fabricação da broca, em seguida, como a primeira condição não gerou um raio de acordo com a faixa estabelecida, buscou-se aplicar condições mais severas com o objetivo de gerar um raio de acordo com a faixa estabelecida. A Tabela 3 mostras os valores utilizados de velocidade de rotação e tempo de processo em cada uma das brocas.

Tabela 3 - Condições do processo de arraste abrasivo

Condições	V - Velocidade de rotação (rpm)	T - Tempo de processo (min)
Broca 04	45	8
Broca 05	45	25
Broca 08	55	13
Broca 07	60	15

Fonte: Autor (2025).

Neste processo, assim como no processo de escovagem, a cada condição aplicada, o gume foi medido. Assim, algumas operações não ocorrerão de forma contínua.

3.2.5 Definição do material do corpo de prova

O material utilizado para a fabricação das peças usinadas é o ferro fundido nodular GGG 40/SAE D4512, com resistência à tração de 510 Mpa, limite de escoamento 323 Mpa e composição química conforme Tabela 4, com valores obtidos através de uma espectrometria.

Tabela 4 - Composição química do ferro fundido nodular GGG40

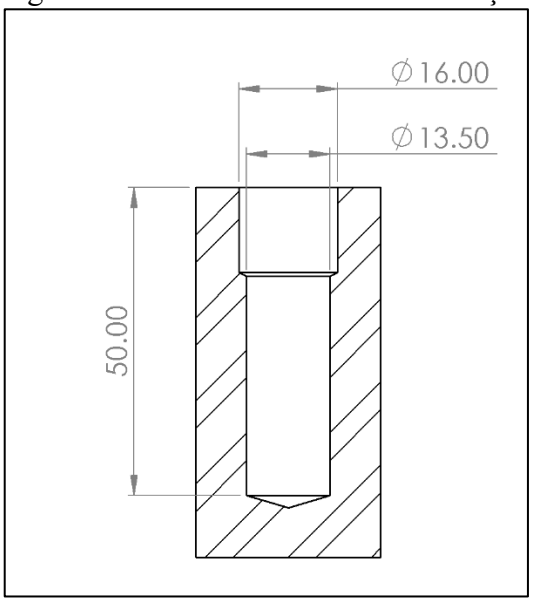
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	B
Teor [%]	3,63	2,49	0,47	0,021	0,003	0,043	0,035	0,0002

Fonte: Castertech (2025).

O ferro fundido nodular GGG 40/SAE D4512 trata-se de um material que tem como principais elementos de liga o carbono (C), silício (Si) e Manganês (Mn). Apresenta matriz metálica orientativa Ferrítico-Perlitico, com 82% de ferrita e 18% de perlita. É amplamente utilizado na indústria e apresenta boa usinabilidade. Entretando, devido ao grande volume de peça usinadas e possível utilização de diferentes lotes de peças, pequenas variações de propriedades do material podem ocorrer.

A peça usinada é um cubo traseiro utilizado em ônibus e caminhões, e possui oito furos escalonados, ou seja, furos com diferentes diâmetros. com profundidade de 50 mm. A Figura 30 mostra o detalhe ilustrativo do furo.

Figura 30 - Detalhe ilustrativo da furação



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O furo é realizado de forma contínua, possui profundidade total de 50 mm, com o diâmetro menor de 13,5 mm e diâmetro maior de 16 mm com profundidade de 14 mm.

3.2.6 Processo de furação

Na furação, assim como qualquer processo de usinagem, muitas variáveis influenciam o processo de forma significativa. Neste caso, os parâmetros foram mantidos os mesmos já realizados pela empresa. A velocidade corte (v_c) e avanço (f) são, respectivamente, 180 m/min e 1.300 mm/min, além disso, é realizado com a peça fixada através de dispositivo mecânico. A condição de lubrirrefrigeração é interna de alta pressão, utilizando fluido de usinagem sintético Synergy 905. Estes parâmetros são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de corte utilizados nos testes de usinagem

Descrição	**Valores**
Velocidade de corte (v_c)	180 m/min
Avanço (f)	1.300 mm/min
Profundidade de furação	64 mm
Estratégia de furação	Furação contínua
Condição de lubrirrefrigeração	Interna de alta pressão

Fonte: Autor (2025).

O processo de furação foi conduzido até cada broca atingir 4.800 furos e a cada 1.600 furos o teste foi interrompido para analisar o comportamento do desgaste, submeter as brocas a uma análise visual utilizando um estereoscópio ótico para verificar o surgimento de possíveis falhas e fazer a medição do desgaste de flanco máximo ($VB_{Máx}$).

3.2.7 Equipamentos

O equipamento utilizado para a fabricação da ferramenta é uma retificadora cilíndrica GE4-A/P CNC 21i-TB da marca Fanuc. Com rebolo de dureza média, tamanho de grão D46 e concentração C75 para o desbaste e rebolo de dureza baixa, tamanho de grãos D15, concentração C50, com refrigeração para o acabamento.

Para o processo de tratamento de gume por arraste abrasivo, se utiliza o equipamento modelo DF-3 Tool, da marca OTEC, com rotação máxima do rotor de 60 rpm, possuindo sistema de rotação planetário e tanque com capacidade máxima para 85 litros de mídia abrasiva.

Já durante o processo de tratamento por escovagem, utilizou-se uma afiadora universal da marca Tacchella, modelo 4M, com velocidade de rotação 4.700 rpm.

Para a verificação da geometria da ferramenta, utiliza-se uma máquina de medição de universal da marca Zoller (Alemanha), modelo Genius 3S antes e após a preparação dos gumes, e para a caracterização dos gumes, foi utilizado o microscópio Alicona de alta resolução, da marca Bruker.

A máquina-ferramenta que se utilizou nos testes de usinagem é um centro de usinagem da marca Okuma, modelo MF-46VA, com 42,4 kVA de potência aparente, velocidade máxima de rotação 12.000 rpm e avanço máximo de 60.000 mm/min. Para a fixação das ferramentas utiliza-se mandril de fixação Rego-fix, modelo powRgrip.

As imagens para verificação de defeitos e desgastes das brocas helicoidais foram obtidas com a utilização de estereoscópio binocular, da marca Entex, modelo TNE-10B, com ampliação máxima de 45 vezes, que conta com uma câmera CCD acoplada e o software ScopePhoto para captura das imagens.

Por fim, também para avaliação dos desgastes foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (MEV) da marca Tescan, modelo Mira3, de inspeção industrial de alto rendimento para caracterização de materiais em escala submicron, com resolução nanométrica e ampliação máxima de 1.000.000 (um milhão) de vezes.

3.2.8 Análise estatística dos resultados

Após a realização dos testes de usinagem, verificação do comportamento do desgaste e desempenho das ferramentas, através do Google Colab, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e um teste de comparações múltiplas Tukey HSD, com nível de significância de 5%, para comparar as médias de desgaste das três condições de tratamento utilizadas e identificar se há uma diferença significativa entre elas.

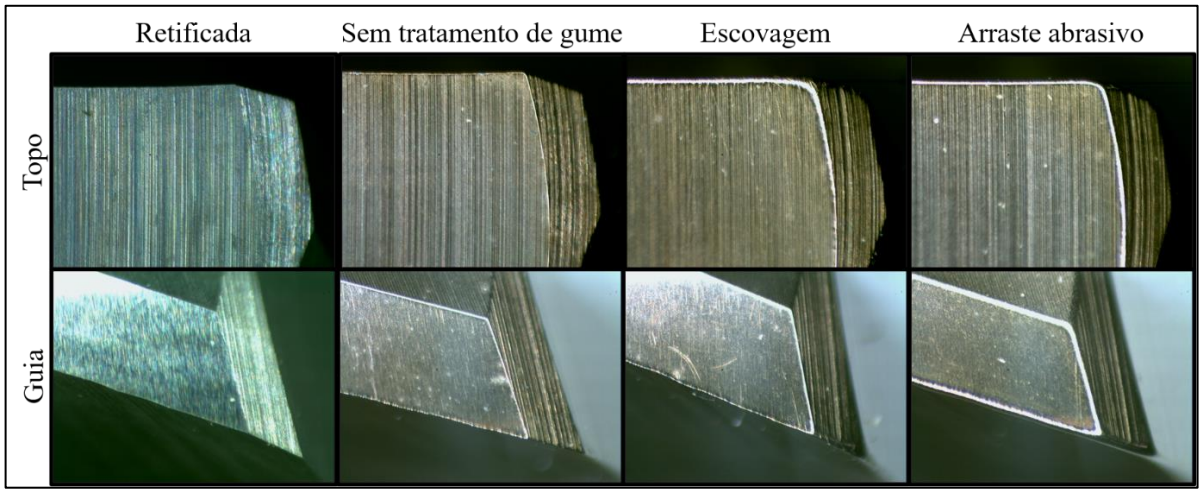
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos processos de tratamento de gume realizados, assim como a caracterização dos gumes das brocas sem tratamento e das brocas tratadas através dos processos de escovagem e arraste abrasivo. Além disso, é mostrado o desempenho das brocas na usinagem do ferro fundido e também os tipos e mecanismos de desgaste gerados após os testes de usinagem.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GUMES

De modo a verificar a diferença das ferramentas após o processo de retificação com as ferramentas sem tratamento de gume com revestimento e as ferramentas com tratamentos de gume também revestidas, capturou-se imagens no estereoscópio ótico com ampliação de 30 vezes. A Figura 31 mostra as vistas de topo e guia das ferramentas.

Figura 31 - Comparação das ferramentas retificadas, sem tratamento de gume e com tratamentos



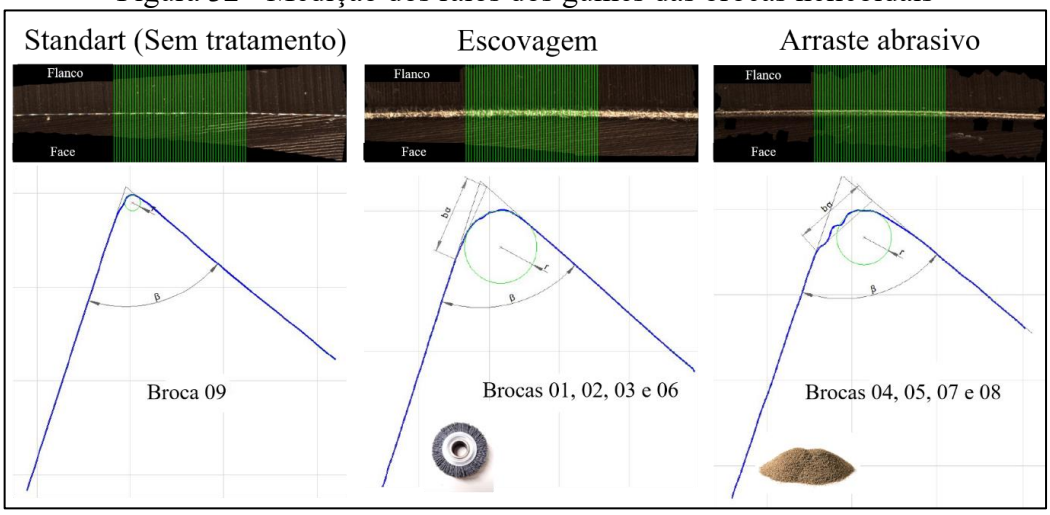
Fonte: Autor (2025).

Após a análise no estereoscópio, percebe-se que as ferramentas não apresentam falhas oriundas dos processos de fabricação. Em relação aos processos de tratamento de gume, percebe-se que foram efetivos no arredondamento e suavização dos gumes das ferramentas, eliminando possíveis rebarbas ou micro defeitos, além disso, observa-se que influenciaram na eliminação das marcas de rebolo na região do gume. Do mesmo modo, percebe-se que com os processos de revestimento e acabamento pós revestimento, as ferramentas apresentaram diminuição das marcas de rebolo do processo de retificação.

Posteriormente, mediu-se o tamanho dos gumes com o microscópio Alicona, que possibilitou verificar os raios gerados e a geometria dos mesmos.

Em relação a geometria do gume, notou-se que a broca sem tratamento e as brocas com tratamento por arraste abrasivo apresentaram gumes com regiões mais assimétricas e maiores variações do fator k, já as brocas com tratamento de escovagem apresentaram gumes mais simétricos, com fator k próximo a 1. A Figura 32 mostra a região dos gumes analisados e a Tabela 6 apresenta os valores médios do fator k dos gumes.

Figura 32 - Medição dos raios dos gumes das brocas helicoidais



Fonte: Autor (2025).

Tabela 6 - Fator K médio de cada gume

Brocas	Gume	K médio
Broca 01	1	0.771
	2	0.825
Broca 02	1	0.819
	2	0.87
Broca 03	1	0.775
	2	0.856
Broca 04	1	0.651
	2	0.975
Broca 05	1	0.687
	2	0.97
Broca 06	1	0.784
	2	0.784
Broca 07	1	0.732
	2	0.908
Broca 08	1	0.636
	2	1.153
Broca 09	1	0.893
	2	0.891

Fonte: Autor (2025).

Ao efetuar as medições no microscópio, notou-se que no processo de tratamento por arraste abrasivo não foi alcançado o tamanho de raio desejado para a aplicação, ficando na faixa de 38 µm a 56 µm. Já no processo de escovagem alcançou-se gumes com valores na faixa de 50 µm a 70 µm. Os valores encontrados em cada gume das ferramentas podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Raios gerados após o tratamento de gume

Broca	**Tratamento**	**Tamanho dos raios dos gumes 1 e 2 (µm)**
01	Escovagem	50 - 64
02	Escovagem	66 - 59
03	Escovagem	64 - 52
06	Escovagem	70 - 64
04	Arraste	38 - 38
05	Arraste	42 - 52
07	Arraste	45 - 56
08	Arraste	52 - 43
09	Sem tratamento	8 – 9

Fonte: Autor (2025).

Alguns fatores podem justificar os menores raios encontrados e a diferença de tamanhos entre os gumes 1 e 2 em ambos dos processos. No caso do processo de escovagem, como realizou-se a aproximação e afastamento da ferramenta à escova de forma manual, pequenas variações de tempo podem ter ocorrido, além disso, de acordo com Klocke (2018) o desgaste da escova pode influenciar diretamente no arredondamento do gume. Em relação ao processo de arraste, a possível presença de detritos das peças de trabalho no meio abrasivo pode levar a diminuição da eficiência do tratamento, impossibilitando ou inviabilizando o alcance de raios superiores aos encontrados.

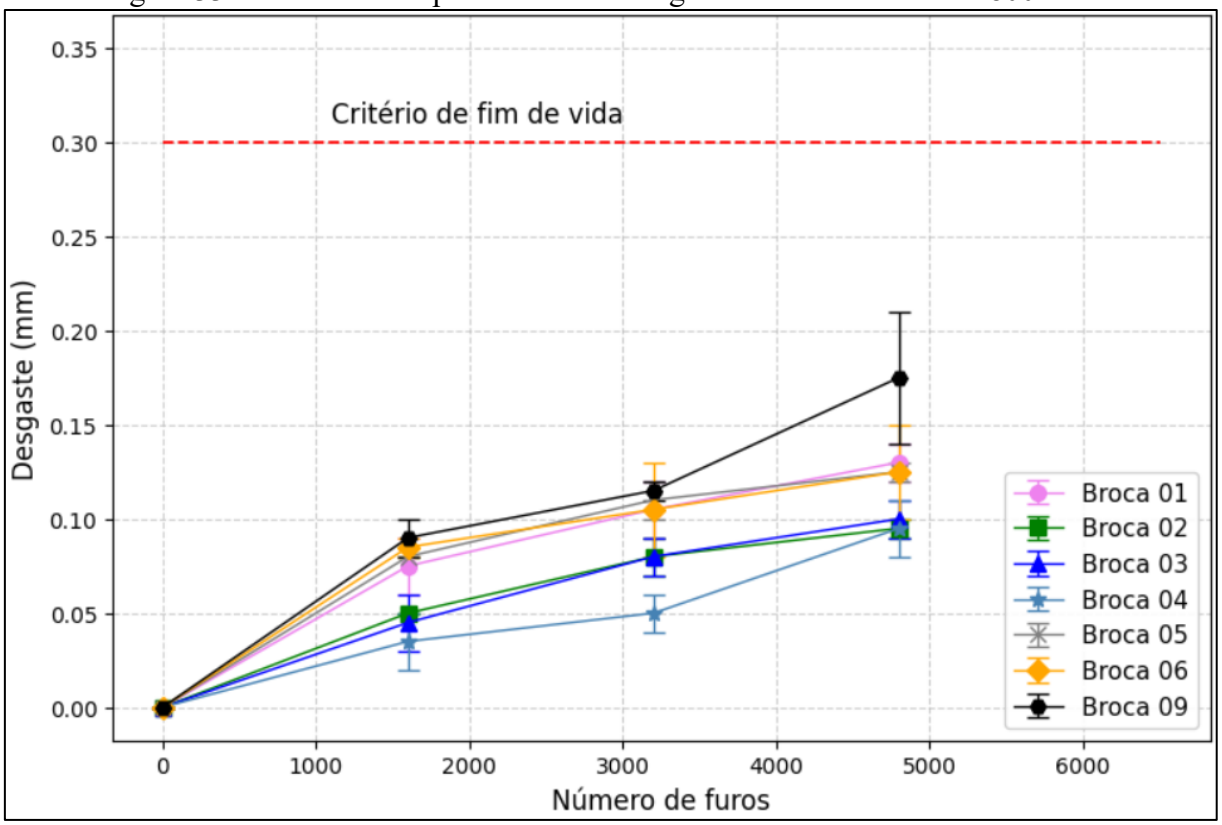
4.2 DESEMPENHO DAS FERRAMENTAS

Durante os testes de usinagem, a cada 1.600 furos realizados por cada uma das brocas, o teste foi interrompido para a medição dos desgastes e verificação de possíveis defeitos que possam surgir devido ao processo de furação. Inicialmente, para determinar o fim dos testes o objetivo era alcançar um critério de fim de vida das ferramentas, entretanto, duas brocas com tratamento por arraste abrasivo quebraram no início dos testes de usinagem devido a falhas de operação e nas outras sete, devido a dificuldades na continuação dos testes de usinagem, a

análise e comparação do desgaste foi realizada até o momento em que as brocas realizaram 4.800 furos. Contudo, pode-se verificar diferenças consideráveis no desempenho das ferramentas e algumas particularidades em relação aos desgastes.

A Figura 33 apresenta a curva de comportamento do desgaste de cada uma das brocas até 4.800 furos. Para isso, o desgaste de flanco máximo ($VB_{Máx}$) foi medido no estereoscópio.

Figura 33 - Curva de comportamento do desgaste de cada broca até 4800 furos

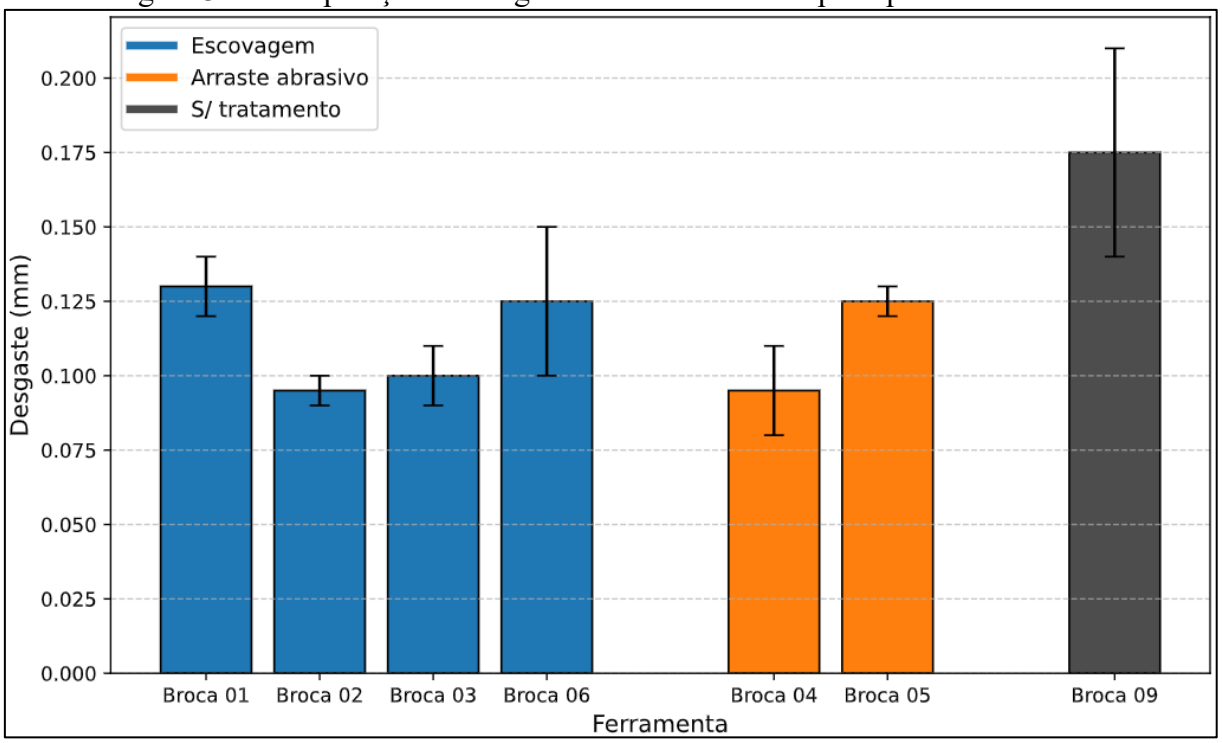


Fonte: Autor (2025).

De forma geral, todas as brocas apresentaram a curva do comportamento do desgaste similares, com desgaste acentuado no primeiro estágio de testes (1.600 furos) e posteriormente uma estabilização na curva até a realização de 4.800 furos, com exceção da broca sem tratamento (Broca 09) que expôs um desgaste acelerado a partir de 3200 furos. Condizente com o que está escrito na literatura por Klocke (2011) e Machado et al. (2015), que dividem a vida da ferramenta em três estágios, o primeiro apresentando um desgaste acelerado e um assentamento do gume ao processo, o segundo caracterizado por uma estabilização e adaptação da ferramenta ao processo e aos mecanismos de desgaste e, por fim, o terceiro estágio, onde a ferramenta entra no estágio de desgaste catastrófico, iniciando novamente uma aceleração no desgaste, estágio o qual a broca 09 pode ter atingido.

Em relação ao desgaste do gume principal, a Figura 34 apresenta a comparação do desgaste médio das brocas com tratamento por escovamento, tratamento por arraste a sem tratamento, além do desgaste maior e menor de cada gume após os 4.800 furos realizados. Observa-se que as brocas com tratamento de gume apresentaram desempenhos semelhantes, ficando na faixa de 0.08 mm e 0.15 mm, com desgaste médio de 0.1125 mm nas brocas com tratamento por escovagem e 0.11 mm nas brocas com tratamento por arraste abrasivo, representando assim, um desempenho médio superior de aproximadamente 55% e 59% acima em relação a broca sem tratamento, respectivamente, que apresentou desgastes na faixa de 0,21 mm a 0,14 mm e desgaste médio de 0.175 mm.

Figura 34 - Comparação do desgaste médio das brocas por tipo de tratamento



Fonte: Autor (2025).

Comparando apenas o desgaste entre as brocas submetidas aos dois tipos de tratamento de gume não se evidencia diferenças significativas em seu desempenho, indicando que, dentro das condições propostas e até o momento que os testes foram realizados, o tipo de tratamento aplicado não influenciou de forma relevante os resultados obtidos. Da mesma forma, a variação dos raios dos gumes gerados também não apresentou impacto expressivo, demonstrando que tanto o acabamento quanto a geometria resultante se mantiveram equivalentes entre os grupos para esta aplicação específica.

Posteriormente, com o intuito verificar de forma mais detalhada e identificar se as brocas apresentaram médias de desgaste significativamente diferentes, através do Google Colab, realizou-se uma ANOVA e um teste de comparações múltiplas Tukey HSD. A Tabela 8 mostra o teste.

Tabela 8 - Teste de comparações múltiplas Tukey

Grupo 1	Grupo 2	Diferença entre as médias dos grupos	Valor-p ajustado	Mais baixo	Mais alto	Rejeitar
Broca 01	Broca 02	-0.0212	0.9972	-0.1436	0.1011	Falso
Broca 01	Broca 03	-0.0212	0.9972	-0.1436	0.1011	Falso
Broca 01	Broca 04	-0.0325	0.9742	-0.1548	0.0898	Falso
Broca 01	Broca 05	0.0013	1	-0.1211	0.1236	Falso
Broca 01	Broca 06	0.0013	1	-0.1211	0.1236	Falso
Broca 01	Broca 09	0.0175	0.9991	-0.1048	0.1398	Falso
Broca 02	Broca 03	0	1	-0.1223	0.1223	Falso
Broca 02	Broca 04	-0.0113	0.9999	-0.1336	0.1111	Falso
Broca 02	Broca 05	0.0225	0.9962	-0.0998	0.1448	Falso
Broca 02	Broca 06	0.0225	0.9962	-0.0998	0.1448	Falso
Broca 02	Broca 09	0.0388	0.941	-0.0836	0.1611	Falso
Broca 03	Broca 04	-0.0113	0.9999	-0.1336	0.1111	Falso
Broca 03	Broca 05	0.0225	0.9962	-0.0998	0.1448	Falso
Broca 03	Broca 06	0.0225	0.9962	-0.0998	0.1448	Falso
Broca 03	Broca 09	0.0388	0.941	-0.0836	0.1611	Falso
Broca 04	Broca 05	0.0388	0.969	-0.0886	0.1561	Falso
Broca 04	Broca 06	0.0388	0.969	-0.0886	0.1561	Falso
Broca 04	Broca 09	0.05	0.831	-0.0723	0.1723	Falso
Broca 05	Broca 06	0	1	-0.1223	0.1223	Falso
Broca 05	Broca 09	0.0162	0.9994	-0.1061	0.1386	Falso
Broca 06	Broca 09	0.0162	0.9994	-0.1061	0.1386	Falso

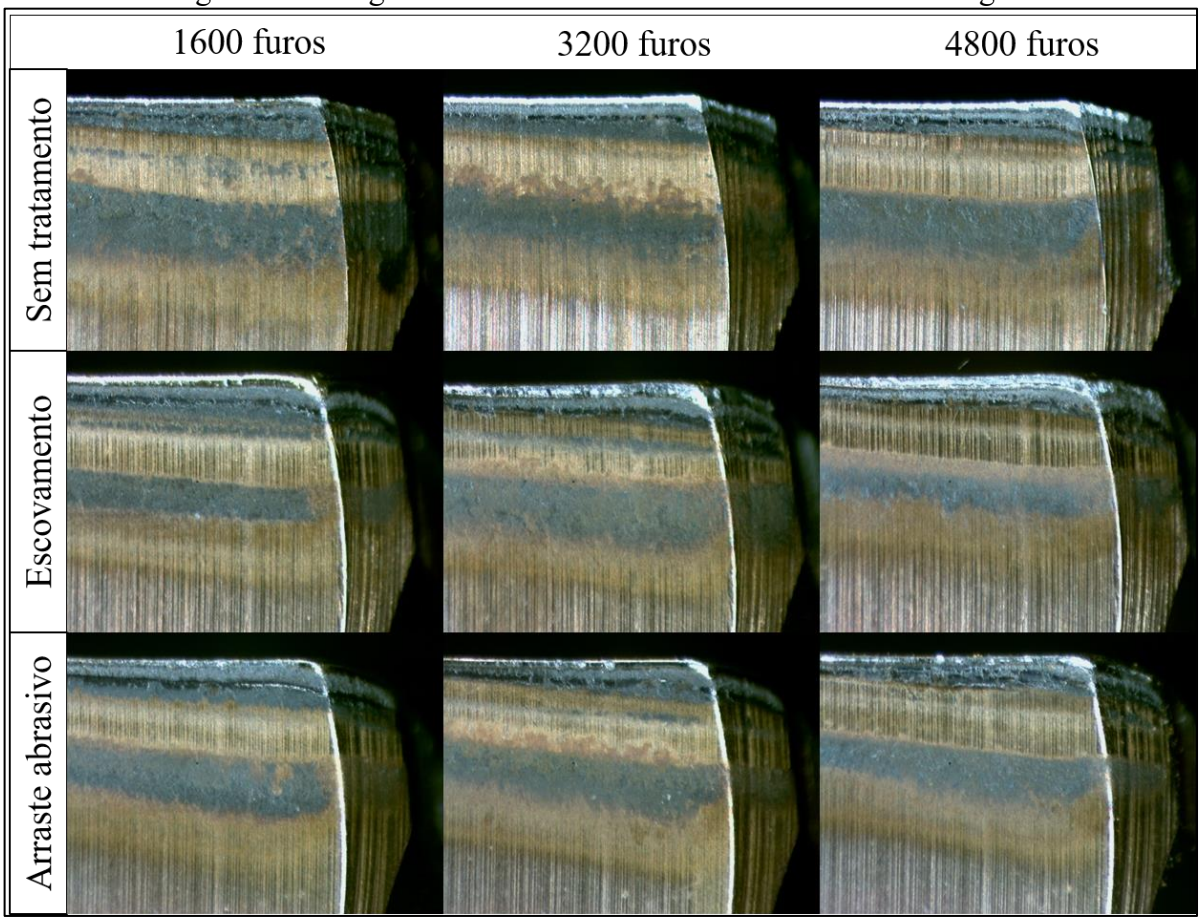
Fonte: Autor (2025).

O resultado mostrou que não há diferença entre os pares de brocas de forma significativa, ou seja, todas as brocas apresentaram desempenho estatisticamente semelhantes em relação ao desgaste médio neste teste. Entretanto, entende-se que devido a amostra ser pequena e possuir uma variabilidade alta, essa análise estatística perde de forma expressiva seu nível de confiança, limitando a possibilidade de detectar diferenças. Assim, verificando que as comparações envolvendo a Broca 09 aparecem repetidamente entre as que têm maior diferença de média, principalmente em relação as Brocas 02, 03 e 04, entende-se que ela tem um comportamento diferente das outras brocas e, possivelmente, com número de amostras maior, essas diferenças se tornariam mais evidentes estatisticamente.

4.3 DESGASTES DAS FERRAMENTAS

Em relação aos tipos de desgaste, através do estereoscópio binocular com ampliação de 30 vezes, pode-se observar que todas ferramentas apresentaram tipos de desgaste similares da primeira fase dos testes de usinagem, na qual realizou-se 1.600 furos, até a terceira fase, após 4.800 furos realizados. Apresentando desgastes de guia lateral, desgaste do gume transversal, desgaste da quina e, principalmente, o desgaste de flanco. A Figura 35 mostra a comparação do desgaste de flanco de cada condição de tratamento durante as 3 etapas de testes.

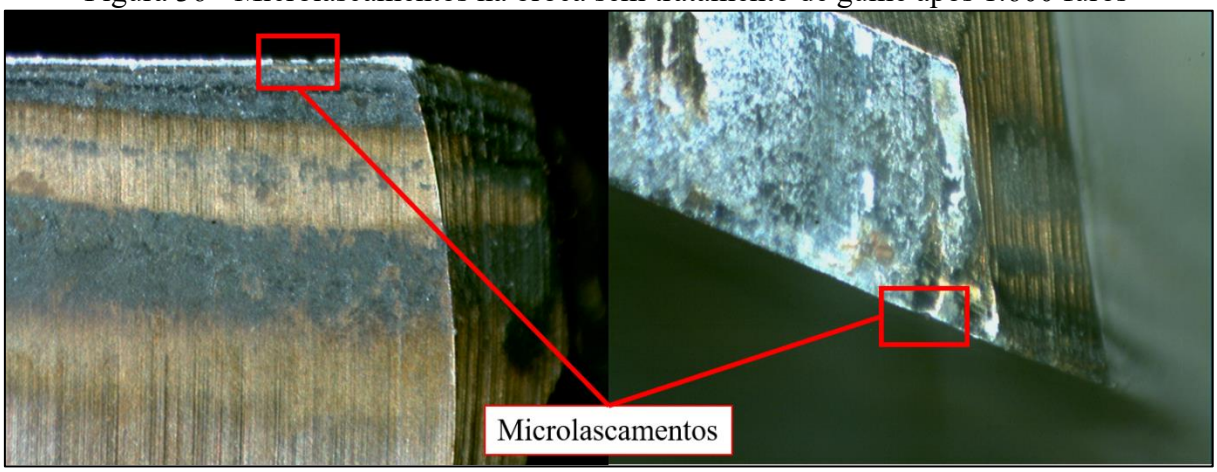
Figura 35 - Desgaste de flanco em cada fase dos testes de usinagem



Fonte: Autor (2025).

Nas três etapas de testes, observou-se que nas três condições de tratamento de gume as brocas apresentaram um desgaste predominantemente por adesão, entretanto, após a primeira etapa de testes a broca sem tratamento de gume apresentou alguns microlascamentos no gume principal e no gume secundário, conforme mostra a Figura 36.

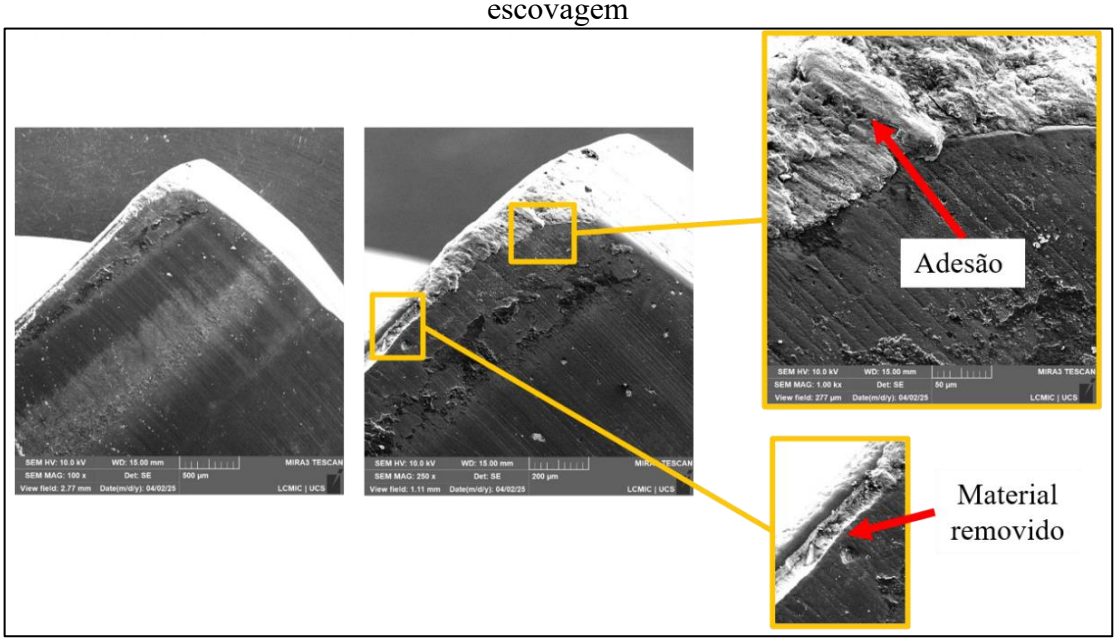
Figura 36 - Microlascamentos na broca sem tratamento de gume após 1.600 furos



Fonte: Autor (2025).

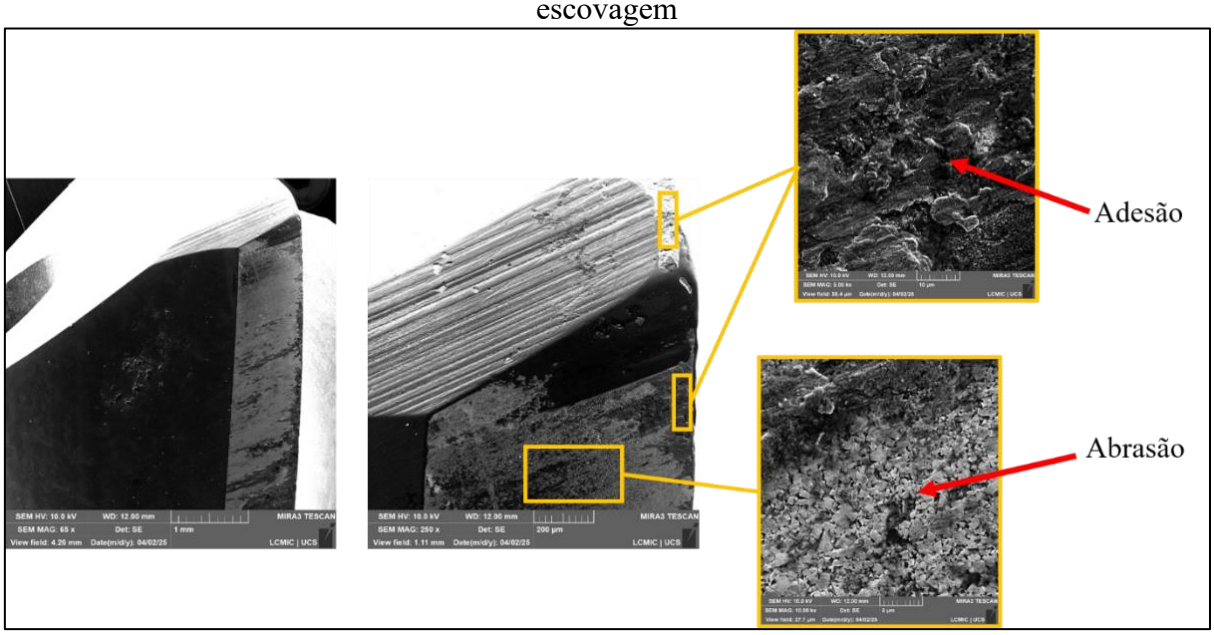
Na sequência dos testes pode-se alcançar o fim de vida em duas brocas, a broca 05 com tratamento por arraste abrasivo e a broca 06 com tratamento por escovagem, ambas após 10.400 furos realizados, demais ferramentas não alcançaram o fim de vida, exceto a broca 09, que quebrou durante os testes e não foi possível verificar os tipos e mecanismo de desgastes. Então, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) por emissão de campo, pode-se realizar imagens com ampliações de até 10.000 vezes e analisar de forma mais detalhada os tipos e mecanismos de desgastes na região do gume principal e secundário das duas ferramentas. Os mecanismos de desgaste da broca 06 podem ser observados nas Figuras 37 e 38, já os mecanismos da broca 05 nas Figuras 39 e 40.

Figura 37 - Mecanismo de desgaste do gume principal da broca com tratamento por escovagem



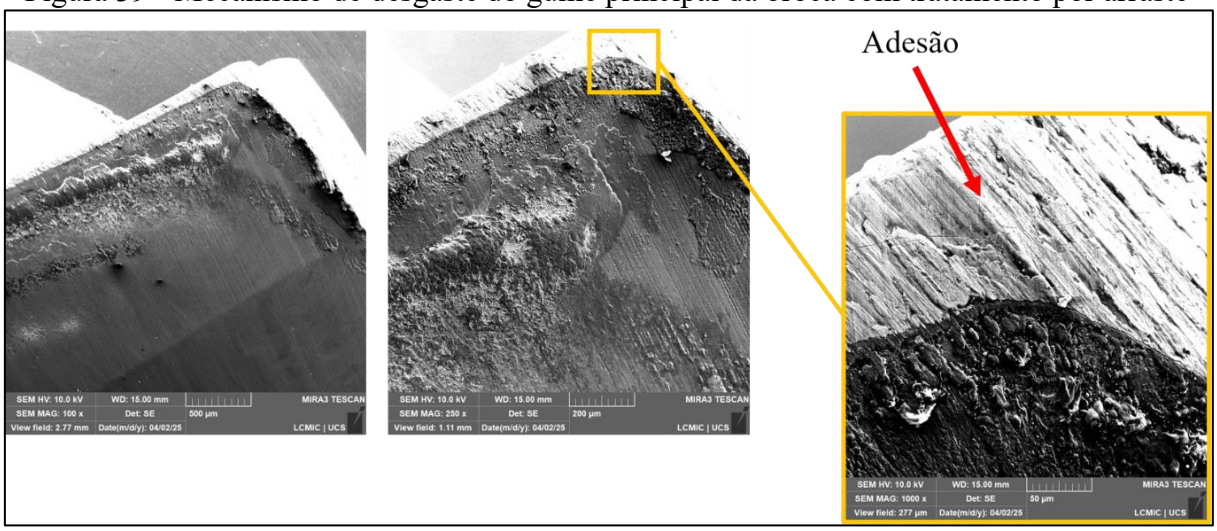
Fonte: Autor (2025).

Figura 38 - Mecanismos de desgaste do gume secundário da broca com tratamento por escovagem



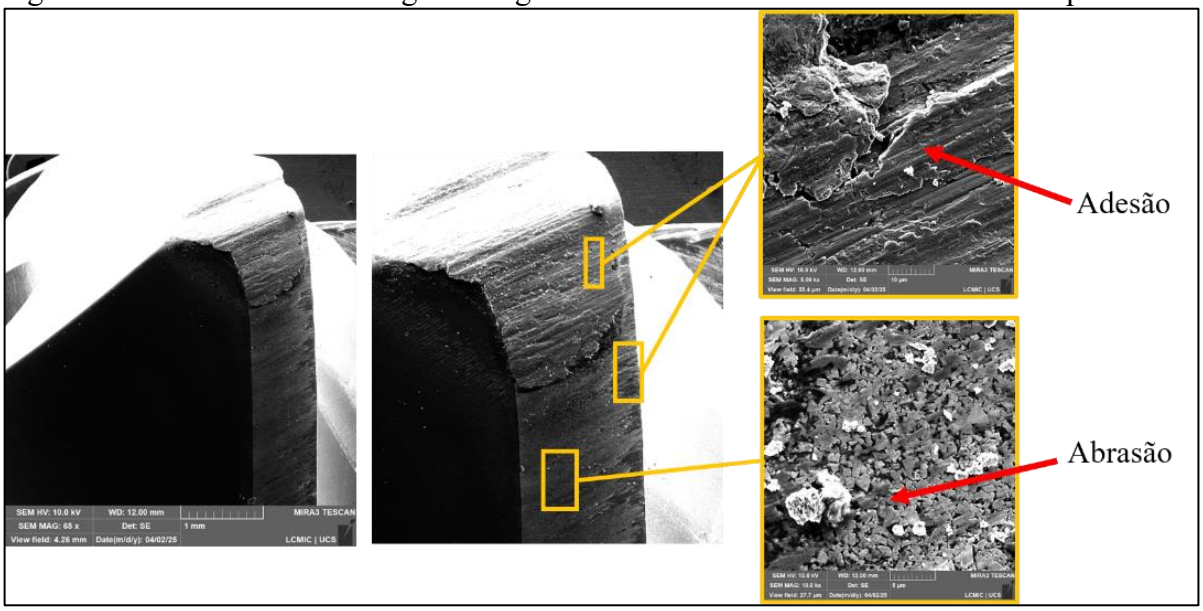
Fonte: Autor (2025).

Figura 39 - Mecanismo de desgaste do gume principal da broca com tratamento por arraste



Fonte: Autor (2025).

Figura 40 - Mecanismos de desgaste do gume secundário da broca com tratamento por arraste



Fonte: Autor (2025).

De forma geral, nas duas regiões verificadas pode-se observar simultaneamente os mecanismos de adesão e abrasão, em conformidade com Machado et al. (2015) e Klocke (2018), que indicam que na usinagem de ferro fundido esses desgastes podem ocorrer de forma predominante.

As brocas apresentaram o desgaste de flanco com o mecanismo predominante sendo a adesão, causado devido ao contato entre a ferramenta e o material usinado em regiões de alta temperatura e pressão, ocorrendo assim micro soldas do material da peça e da ferramenta, ou seja, partículas do ferro fundido se fundiram ou aderiram temporariamente à ferramenta. Desta fora, caso esse material aderido se destaca, pode causar a remoção de pequenas porções da ferramenta, gerando crateras ou também evoluir para falhas catastróficas.

No desgaste da guia ou gume secundário os mecanismos predominantes se mostraram a adesão e a abrasão. O desgaste por abrasão pode ser causado pela presença de nódulos de grafita e carbonetos duros presentes no ferro fundido nodular, que atuam como abrasivos, desgastando a superfície e produzindo marcas ou micro fissuras.

De forma geral, os resultados obtidos ao longo dos testes de usinagem evidenciam que os tratamentos de gume aplicados nas brocas desempenharam um papel importante no controle dos mecanismos desgastes observados. Entende-se que os tratamentos contribuíram para minimizar os desgastes abrasivos e adesivos excessivos, além de atenuarem a formação de trincas e lascamentos, indicando que a modificação da microgeometria atuou de forma eficaz nas regiões mais críticas das ferramentas, prolongando a vida útil e melhorando a usinagem do

ferro fundido, visto que a broca sem tratamento de gume apresentou microlascamentos no início dos testes e quebrou antes das demais na fase final dos testes, entendendo assim que a não preparação do gume gerou uma aceleração na propagação do desgaste e um corte mais instável.

Comparando as duas condições de tratamento de gume, pode-se observar que ambas as brocas tratadas apresentaram um comportamento de desgaste estável durante o processo de corte, com maior uniformidade na propagação dos desgastes, entretanto, após os 10.400 furos a broca com tratamento por arraste apresentou maior adesão no gume principal e na quina da ferramenta em relação a broca com tratamento por escovagem.

5 CONCLUSÕES

Partindo dos objetivos definidos para este trabalho, pode-se concluir que as condições propostas para os processos de tratamento de gume foram efetivas na modificação e suavização da microgeometria dos gumes das ferramentas, efetuando o arredondando e minimizando defeitos na região do gume que possam prejudicar o desempenho das brocas.

Os dois tratamentos apresentaram diferenças consideráveis nos tamanhos dos raios e para ambos os métodos alguns fatores devem ser observados. O tratamento por escovagem mostra-se adequado para a geração de raios maiores em um período menor de tempo, porém, o desgaste da escova dificulta o controle e repetibilidade do processo. Já o tratamento por arraste abrasivo tem maior capacidade de repetibilidade e controle do processo, entretanto, com o desgaste da mídia abrasiva há uma perda de rendimento, dificultando e inviabilizando a geração de raios maiores.

Tratando dos tipos e mecanismos de desgaste, de forma geral, a aplicação dos tratamentos de gume foi fundamental para alterar a interação entre ferramenta e material usinado, resultando em uma atuação mais controlada dos tipos e mecanismos de desgaste nas regiões mais críticas do gume, e, consequentemente, em uma usinagem mais eficiente e previsível.

Em relação ao desempenho das ferramentas, todas as brocas apresentaram a curva do comportamento do desgaste médio similares, com desgaste acentuado no primeiro estágio de testes, após 1.600 furos e, posteriormente uma estabilização na curva até a realização de 4.800 furos, exceto a broca sem tratamento, que apresentou um desgaste acentuado na faixa de 3.200 a 4.800 furos.

As brocas com tratamento de gume apresentaram desgastes na faixa de 0.08 mm e 0.15 mm, com desgaste médio de 0.1125 mm nas brocas com tratamento por escovagem e 0.11 mm nas brocas com tratamento por arraste abrasivo, representando assim, um desempenho médio superior de aproximadamente 55% e 59% acima em relação a broca sem tratamento, respectivamente, que apresentou desgastes de 0,21 mm a 0,14 mm e desgaste médio de 0.175 mm.

Por fim, através da realização dos testes de furação no ferro fundido com esse número de amostras, não se observou diferenças significativas de desempenho entre os dois tratamentos utilizados e os diferentes raios gerados. Assim, entende-se que ambos tratamentos se mostraram efetivos no tratamento de gume de broca helicoidais para a usinagem do ferro fundido nodular, atuando no controle do desgaste, aumento da vida útil e confiabilidade no processo de

usinagem. Desta forma, o tratamento por escovagem se mostra uma alternativa viável para o processo além do tratamento por arraste abrasivo, já utilizado nesta aplicação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento do trabalho observou-se algumas melhorias que podem ser elaboras em trabalhos futuros.

Sugere-se estudar o comportamento do desgaste das escovas durante o processo por escovamento e analisar a influência do desgaste da mídia abrasiva no processo por arraste abrasivo, com o intuito de haver maior confiabilidade e previsibilidade em ambos os processos.

Realizar o tratamento dos gumes utilizando outros processos que também já são amplamente utilizados na indústria, como o tratamento por jateamento abrasivo e comparar com os processos já utilizados.

Aumentar o número de amostras, desta forma, se tornariam mais evidentes as diferenças de desgaste de cada condição de tratamento de gume utilizada, contribuindo para uma melhor análise estatística e de desempenho das ferramentas.

Avaliar aspectos que envolvem a qualidade da peça após os testes de usinagem, como a qualidade superficial do furo e a cilindricidade, contribuindo para a definição das ferramentas que melhor atendem a aplicação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175:** Usinagem – Processos mecânicos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 5419:** Brocas helicoidais – Termos, definições e tipos. Rio de Janeiro, 2009.

AURICH, Jan C.; EFFGEN, Christian. Influence of the machining conditions when preparing cutting edges with elastic bonded grinding wheels. **Production Engineering**, [*s. l.*], v. 9, n. 3, p. 329–336, 2015.

BARBOSA, Marcos Guilherme Carvalho Braulio. **Influência da preparação de aresta e do avanço na usinagem do aço VP20TS Influência da preparação de aresta e do avanço na usinagem do aço VP20TS**. Tese de mestrado – Universidade estadual de 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.

BAUER, Joshua. Seminararbeit Weiterentwicklung eines vollautomatisierten Bürstverfahrens zur Schneidkantenpräparation. [*s. l.*], 2015.

BERGS, T. *et al*. Preparation of symmetrical and asymmetrical cutting edges on solid cutting France on solid cutting Preparation of symmetrical and asymmetrical cutting tools using brushing tools with diamond grits tools using brus. **Procedia CIRP**, [*s. l.*], v. 93, p. 873–878, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.028.

BIERMANN, Dirk *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.

BIERMANN, Dirk; TERWEY, Ina. 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, Dirk; WOLF, Mark; ASSMUTH, Robert. 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.

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) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

BORDIN, Fernando Moreira; ZEILMANN, Rodrigo Panosso. 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.

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

CASTILLO, Willian Jefferson González. Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Broca de Metal-Duro com Canais Retos. **Flora**, [*s. l.*], p. 25, 2010.

CHEUNG, F. Y. *et al.* Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills. **Journal of Materials Processing Technology**, [*s. l.*], v. 208, n. 1–3, p. 196–204, 2008.

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

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

EISING, OLANDIR. **A influência dos parâmetros de corte na furação profunda no fero fundido nodular fe42012 com brocas helicoidais**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Centro Universitário Tupy – UNISOCIESC., Joinville, 2014.

FRACARO, Janaina. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. 1. ed. Curitiba: Intersaberes, 2017. *E-book*. Disponível em: https://plataforma.bvirtual.com.br. Acesso em: 12 jan. 2024.

FULEMOVA, Jaroslava; JANDA, Zdenek. Influence of the cutting edge radius and the cutting edge preparation on tool life and cutting forces at inserts with wiper geometry. **Procedia Engineering**, [*s. l.*], v. 69, p. 565–573, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.027.

HARTIG, Jörg *et al.* Cutting edge preparation with elastic bonded diamond grinding wheels: Influence of the interaction of metalworking fluid and grinding wheel on the grinding wheel properties and preparation result. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [*s. l.*], v. 38, p. 350–371, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.05.001.

KLOCKE, F. Manufacturing Process 1 – Cutting. Alemanha: Editora Springer, 2011.

KLOCKE, FRITZ. **Fertigungsverfahren 1:** Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide. 9. ed. Alemanha: Springer Vieweg, 2018. *E-book*. ISBN 978-3-662-54207-1. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54207-1.

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

KONRAD FRIEDRICHS GERMAN CARBIDE. German Carbide Next Generation, 2020. Acesso em: Março de 2024.

MACHADO, ÁLISSON ROCHA; ABRÃO, ALEXANDRE MENDES; COELHO, REGINALDO TEIXEIRA. **Teoria da usinagem do materiais**. 3.ed. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda, 2015. Ebook. ISBN 978-85-212-0846-4

LI, B.; ZHANG, S.; DU, J.; SUN, Y..State-of-the-art in cutting performance and surface integrity considering tool edge micro-geometry in metal cutting process. **Journal Of Manufacturing Processes**, 77, p.380-411, 2022. Elsevier BV.

LV, Dejin *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.

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

OTEC. The Importance of Cutting Edge Preparation. Apresentação, 2017.

OTEC. Otec Precision Finishig Solutions, 2024. Media. Disponível em: https://www.otec.de/en/products/media/. Acesso em Setembro de 2024.

PÉREZ-SALINAS, Cristian F.; DEL OLMO, Ander; LÓPEZ DE LACALLE, L. Norberto. Estimation of Drag Finishing Abrasive Effect for Cutting Edge Preparation in Broaching Tool. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 15, 2022.

RAMESH, Varun. Preparation Preparation in Machining Preparation for. [*s. l.*], n. July, p. 26–30, 2015.

RISSE, KAI. **Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl**. 2006. 153 f. Tese (Doutorado) - Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2006.

RODRÍGUEZ, CARLOS JULIO CORTÉS. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing**. 2009. 205 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção e Máquinas-Ferramentas, Universidade de Kassel, Kassel, 2009.

SANTANA, Moises Izaias. Influência Da Preparação Das Arestas De Corte De Brocas Helicoidais No Processo De Furação. Dissertação de mestrado – Universidade tecnológica federal do Paraná, p. 148, 2015.

SANTANA, Moises Izaias; POLLI, Milton Luiz. Effects of Tool Edge Preparation on Tool Life in Drilling of SAE4144M Steel. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, [*s. l.*], v. 23, n. 10, p. 1113–1122, 2022.

SHAO, Lanying *et al.* Preparation of Cemented Carbide Insert Cutting Edge by Flexible Fiber-Assisted Shear Thickening Polishing Method. **Micromachines**, [*s. l.*], v. 13, n. 10, 2022.

STRAKA, Robert; PETERKA, Jozef; VOPAT, Tomas. Comparison of preparation methods in terms of tool life and surface roughness. **MM Science Journal**, [*s. l.*], v. 2021-Octob, p. 4836–4840, 2021.

TIKAL, FRANZ. **Schneidkantenpräparation - Ziele, Verfahren und Messmethoden:** Berichte aus Industrie und Forschung. 1. ed. Alemanha: Kassel University Press, 2009. ISBN 978-3-89958-494-3.

TSCHÄTSCH, H. **Applied Machining Technology**. 8a ed. Dresden: Springer, 2008.

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, Hao *et al*. Edge Preparation of Carbide Tools with Abrasive Brushing Method. **Ningbo Natural Science Foundation**, 2011.

WANG, Wanting *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, 2020.

YUSSEFIAN, N. Z. *et al.* Electro-erosion edge honing of cutting tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [*s. l.*], v. 59, n. 1, p. 215–218, 2010.

ZEILMANN, Rodrigo P.; ZANELLA, Cassiano. PCD coating polishing effect on the tool wear in high-speed milling of graphite. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [*s. l.*], v. 108, n. 7–8, p. 2579–2593, 2020.

ZHAO, Xf *et al.* Experiment and Modeling of Milling Force Based on Tool Edge Preparation. **Experimental Techniques**, [*s. l.*], p. 761–773, 2021.

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