

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

SALATIEL OLIVEIRA NASCIMENTO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE BROCAS HELICOIDAIS COM PONTEIRAS
INTERCAMBIÁVEIS NA FURAÇÃO DO AÇO ASTM A572 GR50**

CURITIBA

2026

SALATIEL OLIVEIRA NASCIMENTO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE BROCAS HELICOIDAIS COM PONTEIRAS
INTERCAMBIÁVEIS NA FURAÇÃO DO AÇO ASTM A572 GR50**

**Performance analysis of twist drills with interchangeable tips in drilling ASTM
A572 grade 50 steel**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Area de concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador(a): Prof. Dr. Milton Luiz Polli.

CURITIBA

2026



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



SALATIEL OLIVEIRA NASCIMENTO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE BROCAS HELICOIDAIS COM PONTEIRAS INTERCAMBIÁVEIS NA
FURAÇÃO DO AÇO ASTM A572 GR50**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como
requisito para obtenção do título de Mestre Em
Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná(UTFPR).
Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 10 de Junho de 2026

Dr. Milton Luiz Polli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Janaina Fracaro De Souza Goncalves, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Pablo Deivid Valle, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/06/2026.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.”

Robert Collier

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que através de Jesus me deu força e coragem para chegar ao fim deste desafio. Obrigado senhor.

Agradeço à minha esposa Maria Carolina e meu filho Matteo que sempre me deram apoio, incentivaram e abriram mão do direito de estar comigo para que eu pudesse estudar e preparar este trabalho. Amo vocês.

Aos meus pais, que foram sempre os maiores incentivadores ao estudo como meio para o alcance dos objetivos profissional e pessoal.

Ao meu prezado orientador, Prof. Dr. Milton Luiz Polli, pelo conhecimento transmitido, paciência exercida, análise da proposta, revisão e síntese do trabalho.

Ao mestre Alexandre Gonçalves do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR, pela cooperação dos dados e imagens.

À empresa Iscar, pelo fornecimento das ponteiras intercambiáveis, e à empresa Magius Metalurgia, pelo fornecimento da matéria-prima, pela disponibilização do centro de usinagem para a realização dos ensaios e pelo apoio na obtenção dos dados por meio dos equipamentos de medição.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela contribuição durante o curso de mestrado.

Por fim, minha eterna gratidão a todos os envolvidos durante o processo de execução e análise dos experimentos.

RESUMO

A furação representa uma operação fundamental na indústria metal-mecânica, caracterizada pela elevada complexidade dos parâmetros de usinagem e pela sua relevância na obtenção de componentes com alta precisão dimensional. Neste trabalho, avaliou-se o desempenho de brocas helicoidais com ponteiras intercambiáveis constituídas por substrato de metal duro e revestimento PVD de TiAlN, variando-se as geometrias das ferramentas e mantendo-se constante o diâmetro nominal de furação. As ponteiras utilizadas foram os modelos A, B, C e D, sendo os ensaios conduzidos em placas de aço ASTM A572 GR50, com espessura de 20 mm, utilizando um centro de usinagem CNC DOOSAN VERTICAL DNM750LII. Para cada modelo de ponteira, realizaram-se 450 furos, totalizando um conjunto representativo de dados experimentais. A análise de desempenho contemplou a avaliação do desgaste das ponteiras por microscopia eletrônica de varredura, além de medições de diâmetro, circularidade e rugosidade (R_a e R_z). Para o tratamento estatístico dos dados, aplicou-se análise de variância, com o objetivo de verificar a existência de diferenças significativas entre os modelos avaliados. A ponteira modelo C demonstrou o melhor desempenho global, apresentando maior estabilidade do processo, menores valores de rugosidade e menores desvios de circularidade dos furos, associados à geometria autocentrante. A ponteira modelo B apresentou melhoria na precisão dimensional dos furos, em concordância com o esperado para ponteiras de dupla margem, associada à presença da margem de guia, enquanto a ponteira modelo A apresentou maior variabilidade no diâmetro dos furos, relacionada à geometria convencional. Já a ponteira modelo D apresentou maior severidade de desgaste e instabilidade do processo em decorrência da ruptura da quina. A análise estatística confirmou diferenças significativas entre os modelos avaliados, evidenciando a influência direta da geometria das ponteiras na qualidade final da usinagem.

Palavras-chave: furação; ponteiras intercambiáveis; desgaste de ferramenta; aço ASTM A572 GR 50.

ABSTRACT

Drilling represents a fundamental operation in the metal-mechanical industry, characterized by the high complexity of machining parameters and its relevance in obtaining components with high dimensional accuracy. This study evaluated the performance of helical drills with interchangeable tips manufactured from carbide substrate with PVD TiAlN coating, considering different tool geometries while maintaining a constant nominal drilling diameter. The interchangeable tips evaluated were models A, B, C, and D. The experiments were conducted on ASTM A572 Grade 50 steel plates with a thickness of 20 mm, using a DOOSAN VERTICAL DNM750LII CNC machining center. For each tip model, 450 holes were machined, resulting in a representative experimental dataset. The performance analysis included the evaluation of tip wear through scanning electron microscopy, as well as measurements of hole diameter, circularity, and surface roughness parameters (R_a and R_z). Statistical analysis was performed using analysis of variance (ANOVA) to verify the existence of significant differences among the evaluated tool models. The model C tip exhibited the best overall performance, providing greater process stability, lower surface roughness values, and lower hole circularity deviations, which were associated with its self-centering geometry. The model B tip showed improved dimensional accuracy of the machined holes, consistent with the expected behavior of double-margin tips due to the presence of a guiding margin, whereas the model A tip presented greater variation in hole diameter, related to its conventional geometry. The model D tip exhibited more severe wear and greater process instability due to corner fracture. Statistical analysis confirmed significant differences among the evaluated models, demonstrating the direct influence of tip geometry on the final machining quality.

Keywords: drilling; interchangeable tips; tool wear; ASTM A572 Grade 50 steel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ponteira Intercambiável.....	17
Figura 2 - Distribuição dos processos (a) e tempos de usinagem (b)	20
Figura 3 - Aplicações de furação	21
Figura 4 - Condições cinemáticas de furação (movimento ferramenta e peça)	22
Figura 5 - Variáveis do processo de furação	23
Figura 6 - Erros comuns na geometria dos furos.....	24
Figura 7 - Formação do cavaco no processo de usinagem de uma peça por uma ferramenta de corte indicando o plano de cisalhamento	24
Figura 8 - Representação das formas iniciais do cavaco formado em uma broca	25
Figura 9 - Micrografias dos cavacos a diferentes distâncias do centro da broca	26
Figura 10 - Tipos de cavacos - a) Contínuos; b) Parcialmente contínuos; c) Descontínuos; d) Segmentados.....	27
Figura 11 - Formas de cavacos de um processo de furação.....	28
Figura 12 - Terminologia de brocas helicoidais com haste cilíndrica	29
Figura 13 - Geometria da broca helicoidal (DIN 6581).....	30
Figura 14 - Elementos Ponteiras Intercambiáveis	31
Figura 15 - Estrutura da broca helicoidal intercambiável Sumocham.....	32
Figura 16 - Dados de materiais utilizados na fabricação de brocas helicoidais.....	34
Figura 17 - Revestimento PVD sobre o metal duro a) TiAlN multicamada; b) TiAlN monocamada.....	37
Figura 18 - Aspectos relacionados a geometria da ferramenta de corte.....	38
Figura 19 - Superfícies convexas geradas e contornos.....	39
Figura 20 - Estágios de interação da geometria da ferramenta com a superfície	40
Figura 21 - Tipos de afiações	41
Figura 22 - Tolerância de circularidade	43
Figura 23 - Representação de cilindridade	43
Figura 24 - Textura e perfis de rugosidade após a furação do aço ABNT P20	45
Figura 25 - Perfil efetivo de uma superfície	46
Figura 26 - Mecanismos de desgaste	47
Figura 27 - Evolução de desgaste: (1) Desgaste inicial; (2) Desgaste regular; (3) Desgaste moderado por microlascamentos; (4) Desgaste severo e (5) Colapso	49
Figura 28 - Tipos de brocas.....	49
Figura 29 - Modos de desgaste em brocas helicoidais com ponteiras intercambiáveis	50
Figura 30 - Condições de desgaste: (a) a seco, (b) criogênica e (c) abundante	51
Figura 31 - (a) Comportamento da força de avanço sem pré-furo; (b) Comportamento da força de avanço com pré-furo	52
Figura 32 - Classificação dos fluidos de corte	54
Figura 33 - Microestrutura e fração volumétrica perlita e ferrita do aço ASTM A572 GR 50	57
Figura 34 - Corpo de Prova.....	60
Figura 35 - Simulação de usinagem do corpo de prova	61

Figura 36 - a) Leitura de planicidade; b) Digitalização; c) Dados.....	62
Figura 37 - Dados Planicidade	62
Figura 38 - CNC Doosan Vertical DNM750LII	63
Figura 39 - Pré Set – Zoller	63
Figura 40 - Fixação nas extremidades do corpo de prova.....	64
Figura 41 – Broca helicoidal - Modelo DCN 130-039-16A-3D.....	65
Figura 42 - a) Ponteira de simples margem; b) Ponteira de dupla margem	67
Figura 43 – Ponteira modelo A.....	67
Figura 44 – Ponteira modelo B.....	68
Figura 45 – Ponteira modelo C.....	68
Figura 46 – Ponteira modelo D.....	69
Figura 47 - Medição da Rugosidade dos furos	70
Figura 48 - Interferômetro de luz branca (a), corpo de prova avaliado (b)	70
Figura 49 - Máquina MMC Zeiss - Modelo Contura G2 RDS	71
Figura 50 – Leitura dos dados de furação avaliados pela máquina Zeiss	71
Figura 51 - Fluxograma de Atividades.....	73
Figura 52 – Condições das ponteiras após processo de furação.....	74
Figura 53 – Desgaste ponteira A a), desgaste região da guia (b) e aresta transversal (c).....	75
Figura 54 - Resultado da análise EDS dos pontos selecionados (Ponteira A) ..	76
Figura 55 - Desgaste da ponteira B	77
Figura 56 - Resultado da análise EDS dos pontos selecionados (Ponteira B) ..	78
Figura 57 – a) Regiões de desgaste da ponteira C; b) Zona de deslaque do revestimento; c) Região de desgaste analisada.....	79
Figura 58 - Resultado da análise EDS dos pontos selecionados (Ponteira C) ..	80
Figura 59 – a) Regiões de desgaste; b) Lascamento de quina; c) vista aproximada da região de ruptura da ponteira (lascamento)	81
Figura 60 - Resultado da análise EDS dos pontos selecionados (Ponteira D) ..	82
Figura 61 – Representação tridimensional das ponteiras	91
Figura 62 - Análise dos cavacos, Ponteira A (a); Ponteira B (b); Ponteira C (c); Ponteira D (d).....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições recomendadas para usinagem fabricante ISCAR	33
Tabela 2 - Propriedades Mecânicas do Aço ASTM A572	56
Tabela 3 - Faixa de composição química para os diferentes graus do aço ASTM A-572	56
Tabela 4 - Composição química do material	60
Tabela 5 - Análise das ponteiros	66
Tabela 6 - Parâmetros de usinagem	72
Tabela 7 - Análise de variância rugosidade Ra	89
Tabela 8 - Teste Tukey da rugosidade Ra	89
Tabela 9 - Análise de variância rugosidade Rz	90
Tabela 10 - Teste Tukey da rugosidade Rz	90
Tabela 11 – Análise de variância do diâmetro	94
Tabela 12 - Teste tukey diâmetro	95
Tabela 13 - Análise de variância circularidade	97
Tabela 14 - Teste Tukey circularidade	98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Dados desgaste de Flanco (VB)	83
Gráfico 2 - Dados rugosidade ponteira A.....	84
Gráfico 3 - Dados rugosidade ponteira B.....	85
Gráfico 4 - Dados rugosidade ponteira C.....	86
Gráfico 5 - Dados rugosidade ponteira D.....	87
Gráfico 6 - Análise estatística das rugosidades Ra e Rz	88
Gráfico 7 - Variação dos diâmetros de furação.	92
Gráfico 8 - Média dos diâmetros de furação	94
Gráfico 9 - Análise das circularidades das ponteiras	96
Gráfico 10 – Média das circularidades	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
APC	Aresta postiça de corte
ASTM	Sociedade americana de testes e materiais
CFRP	Polímero reforçado com fibra de carbono
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
GR 50	Grau 50
HSS	<i>High Speed Steel</i>
ISO	International Organization for Standardization
MET	Microscópio Eletrônico de Transmissão
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQL	Minimum Quantity Lubrication
PCD	Diamante policristalino
PVD	<i>Physical vapor deposition</i>
Ti-6Al-4V	Liga de titânio composta por 6% de alumínio e 4% de vanádio
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio

LISTA DE SIMBOLOS

2M	Dupla margem
C	Carbono
Ca	Calcio
Co	Cobalto
F_{aa}	Força axial de avanço no processo de usinagem
F_{ap}	Força de corte aresta principal
F_{at}	Força de atrito na interface ferramenta-peça
F_{bp}	Força de empuxo no processo de furação
F_{cs}	Força de cisalhamento na zona de corte
F_f	Força de avanço
Fe	Ferro
KT	Desgaste de cratera
Mn	Manganês
M_t	Momento torsor
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
P	Fósforo
Ra	Rugosidade média
Rz	Rugosidade da superfície média
S	Enxofre
Si	Silício
T_{at}	Temperatura de atrito
T_{bp}	Temperatura na zona de cisalhamento primária
T_{cs}	Temperatura de cisalhamento
VB	Desgaste de flanco
VB_B	Desgaste de flanco médio
$VB_{máx}$	Desgaste máximo de flanco
VB_N	Desgaste de entalhe
V_c	Velocidade de corte
V_e	Velocidade resultante de corte
f	Avanço por rotação
ϕ	Ângulo da direção de avanço
η	Ângulo da direção resultante de corte
φ	Ângulo de cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo de Pesquisa	19
1.2	Organização do trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Processo de furação	20
2.2	Formação de cavacos	24
2.2.1	Tipos e formas de Cavacos.....	26
2.3	Brocas helicoidais	28
2.3.1	Materiais utilizados na fabricação de brocas.....	33
2.3.2	Brocas de aço rápido.....	35
2.3.3	Brocas de Metal Duro.....	36
2.3.4	Revestimento.....	37
2.3.5	Influência da geometria da ferramenta no processo.....	38
2.3.6	Tipos de afiação de uma broca helicoidal.....	40
2.3.7	Tolerâncias Geométricas.....	42
2.3.8	Rugosidade da superfície usinada.....	43
2.3.9	Planicidade da superfície usinada.....	45
2.3.10	Mecanismos de desgaste.....	46
2.3.11	Desgastes em brocas.....	48
2.3.12	Vida útil das ferramentas.....	52
2.4	Meios lubrificarrefrigerantes	53
2.5	Propriedades do aço ASTM A572 GR50	55
2.6	Usinabilidade	57
2.7	Análises Estatísticas Anova e Teste tukey	58
3	MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1	Material usinado	60
3.2	Corpo de prova e simulação de usinagem.....	60
3.3	Planicidade do corpo de prova	61
3.4	Máquina-Ferramenta	63
3.5	Fixação e alinhamento do corpo-de-prova	63
3.6	Meios lubrificarrefrigerantes	64
3.7	Ferramentas de corte	64
3.7.1	Corpo da broca helicoidal.....	65
3.7.2	Classe das Ponteiros.....	65

3.7.3	Ponteira Modelo A.....	67
3.7.4	Ponteira Modelo B.....	68
3.7.5	Ponteira Modelo C.....	68
3.7.6	Ponteira Modelo D.....	69
3.8	Equipamentos para medição de rugosidade 2D e 3D	69
3.9	Equipamento para avaliação do diâmetro e circularidade	70
3.10	Equipamento para análise do desgaste da ferramenta.....	72
3.11	Parâmetros de usinagem	72
3.12	Análises estatísticas	72
3.13	Etapas.....	73
4	RESULTADOS.....	74
4.1	Análise de desgaste das ponteiros	74
4.1.1	Desgaste ponteira A.....	75
4.1.2	Desgaste ponteira B.....	76
4.1.3	Desgaste ponteira C.....	78
4.1.4	Desgaste ponteira D.....	80
4.2	Desgaste de Flanco (VB)	82
4.3	Análise da rugosidade	83
4.4	Análise dos diâmetros	92
4.5	Análise das circularidades	95
4.6	Análise dos cavacos	98
4.7	Síntese do desempenho das ponteiros	100
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
5.1	Conclusões	102
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	103
	REFERÊNCIAS.....	105
	APÊNDICE A - Leitura desgaste de flanco.....	111

1 INTRODUÇÃO

A furação é uma das operações de usinagem mais utilizadas na indústria de manufatura, sendo responsável por uma parcela significativa das operações de remoção de material em componentes mecânicos. Estima-se que aproximadamente um terço das operações de usinagem realizadas em ambientes industriais envolvam processos de furação, especialmente em setores como o automotivo, aeroespacial e de equipamentos industriais, nos quais a produção de furos com elevada precisão dimensional e adequada integridade superficial é fundamental para garantir o desempenho estrutural das peças (ASTAKHOV, 2014; SIKANDER et al., 2025). Problemas associados à baixa qualidade dos furos, como elevada rugosidade, desvios dimensionais e irregularidades geométricas, podem comprometer a vida útil dos componentes e aumentar os custos de produção devido à necessidade de retrabalho ou substituição das peças.

Nesse contexto, diversos estudos têm investigado os fenômenos envolvidos no processo de furação, incluindo mecanismos de formação de cavaco, geração de calor, forças de corte, desgaste de ferramenta e integridade superficial do material usinado. Pesquisas recentes demonstram que parâmetros de usinagem, geometria da ferramenta e condições de lubrificação exercem influência direta sobre o desgaste da ferramenta e sobre a qualidade final dos furos produzidos. Além disso, a interação entre velocidade de corte, avanço e geometria da aresta de corte pode alterar significativamente a estabilidade do processo e o desempenho da ferramenta ao longo de sua vida útil (ZHANG et al., 2022; SIKANDER et al., 2025).

Entre os avanços tecnológicos aplicados ao processo de furação, destaca-se o desenvolvimento de ferramentas com ponteiros intercambiáveis, que têm sido amplamente utilizadas em aplicações industriais devido à sua elevada produtividade e à facilidade de manutenção. Esse tipo de ferramenta permite a substituição rápida da aresta de corte sem a necessidade de remover todo o corpo da ferramenta, reduzindo o tempo de parada da máquina e os custos associados à troca de ferramentas. Além disso, a utilização de ponteiros intercambiáveis possibilita a aplicação de diferentes geometrias de corte em um mesmo corpo de ferramenta, permitindo adaptar o processo às características do material usinado e às condições de corte empregadas, conforme Figura 1.

Figura 1 - Ponteira Intercambiável



Fonte: Tungaloy, apud Manufatura site.com (2022)

Apesar dessas vantagens, a adoção desse tipo de ferramenta está diretamente relacionada às limitações observadas no desempenho de ferramentas convencionais. O desgaste acelerado das arestas de corte em brocas inteiriças de metal duro representa um desafio significativo na furação de materiais de baixa usinabilidade, resultando em elevados custos associados à substituição e ao descarte dessas ferramentas. Nesse contexto, as brocas com ponteiras intercambiáveis surgem como uma alternativa eficiente, pois permitem a reutilização do corpo da ferramenta e apenas a substituição das pontas ou pastilhas de corte. Estudos recentes reforçam essa tendência, onde Wang et al. (2022) desenvolveram um modelo de broca substituível com estruturas em degrau composto e serrilhado, demonstrando redução da delaminação e maior eficiência econômica na furação de compósitos CFRP; enquanto Chen et al. (2024) investigaram a usinagem da liga de titânio Ti-6Al-4V em ultra-alta velocidade, mostrando que brocas com pontas substituíveis apresentaram menor desgaste, maior estabilidade dimensional e vida útil até 30% superior em relação às brocas inteiriças. Esses avanços evidenciam a relevância das brocas intercambiáveis para setores estratégicos como a aeronáutica e a indústria automobilística, que exigem soluções de furação de alta confiabilidade e eficiência operacional.

A evolução das técnicas de manufatura tem impulsionado a busca por métodos de usinagem cada vez mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, torna-se relevante avaliar o desempenho dessas ferramentas na usinagem de materiais estruturais amplamente utilizados na indústria, como o aço ASTM A572 GR50. Esse material é empregado em diversas aplicações estruturais devido à sua elevada resistência mecânica e à sua favorável relação entre desempenho estrutural e custo de produção (Smith et al., 2019).

A diversidade de geometrias, materiais e revestimentos disponíveis para ponteiros intercambiáveis evidencia a complexidade envolvida na otimização do processo de furação em materiais estruturais. Estudos recentes demonstram que a geometria da ponteira exerce influência significativa no desempenho da operação de furação. Akduluma e Kayir (2023), ao compararem diferentes configurações de brocas do tipo U-drill, observaram que parâmetros geométricos da ferramenta afetam diretamente a circularidade, a cilindridade e a rugosidade dos furos produzidos. De forma semelhante, Zhou et al. (2025) verificaram que ferramentas com ponteiros intercambiáveis podem apresentar menor desgaste e melhor qualidade superficial dos furos quando comparadas a brocas inteiriças de metal duro, devido à melhor dissipação térmica e à eficiência na evacuação de cavacos. Além disso, estudos mais recentes indicam que o posicionamento e o ângulo das lâminas intercambiáveis influenciam diretamente as forças de corte, o torque e a estabilidade do processo de furação (Hu et al., 2026). Esses resultados evidenciam a importância da geometria das ponteiros intercambiáveis no desempenho do processo de furação e reforçam a necessidade de estudos comparativos que permitam compreender o comportamento dessas ferramentas em diferentes materiais e condições de usinagem.

Diante desse cenário, torna-se relevante investigar o comportamento de diferentes configurações geométricas de ponteiros intercambiáveis aplicadas ao processo de furação de aços estruturais. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar o desempenho dessas ferramentas na furação do aço ASTM A572 GR50, considerando aspectos relacionados ao desgaste da ferramenta e à qualidade dos furos produzidos. A hipótese da pesquisa sustenta que o uso de ponteiros intercambiáveis pode representar uma estratégia vantajosa em ambientes industriais de alta produtividade, por possibilitar trocas rápidas de aresta de corte, reduzir o tempo de máquina parada, ampliar a vida útil das ferramentas e permitir maior adaptabilidade do processo por meio da utilização de diferentes geometrias de corte. Espera-se, com

isso, compreender o comportamento dessas ferramentas em diferentes condições operacionais e fornecer subsídios técnicos relevantes para a tomada de decisão no setor metalúrgico, contribuindo para o aumento da eficiência e da sustentabilidade nos processos de usinagem.

1.1 Objetivo de Pesquisa

O objetivo principal deste trabalho consiste em comparar o desempenho de diferentes tipos de ponteiros intercambiáveis no processo de furação de corpos de prova em aço ASTM A572 GR 50, com foco em durabilidade das ferramentas e qualidade dos furos obtidos. Com a finalidade de encontrar uma solução mais viável para o objetivo supracitado, este trabalho atenderá os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar os desgastes predominantes dos ferramentais em estudo;
- b) Avaliar a qualidade dos furos obtidos através dos parâmetros de rugosidade, diâmetro e circularidade das diferentes geometrias de ponteiros intercambiáveis empregadas;
- c) Analisar a morfologia dos cavacos gerados durante o processo de furação do aço ASTM A572 GR 50.

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução do estudo, abordando o contexto do tema e os objetivos da pesquisa. O Capítulo 2 contempla a revisão bibliográfica, na qual são discutidos os principais conceitos e estudos relacionados aos assuntos abordados, proporcionando melhor compreensão do trabalho. O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e suas respectivas análises. O Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, no Capítulo 6 encontram-se as considerações finais, seguidas das referências bibliográficas e do apêndice que complementa as informações apresentadas ao longo do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo desta revisão bibliográfica é formar uma base teórica sólida, elaborando os tópicos de maior influência no trabalho, fornecendo um contexto amplo e embasado para as análises e conclusões a serem alcançadas, considerando os principais tópicos que exercem influência no trabalho:

- Furação: Definição, aplicações e processo;
- Mecanismos de desgaste das ponteiros intercambiáveis;
- Propriedades mecânicas, tipos e usinabilidade do aço ASTM A572 GR50;
- Formação do cavaco;
- Análise de Variância (ANOVA).

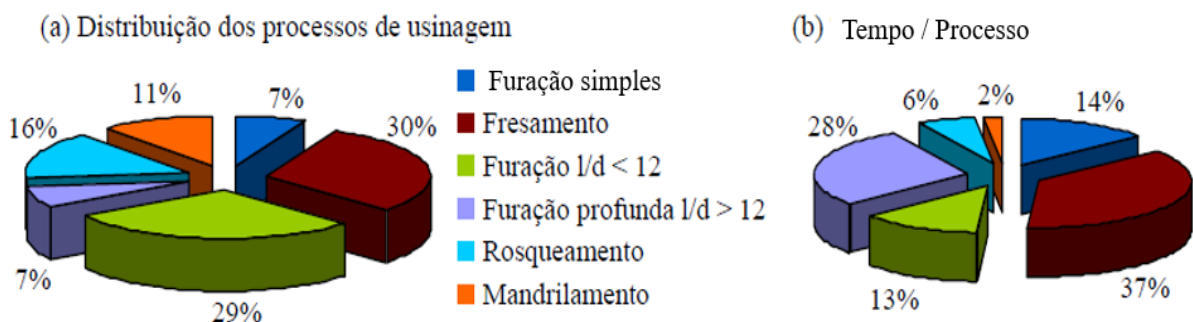
2.1 Processo de furação

Procedimento mecânico de usinagem visa criar furos, geralmente de formato cilíndrico, em peças por meio do uso de uma ferramenta multicortante. Durante essa operação tanto a ferramenta quanto a peça giram, enquanto se deslocam simultaneamente ao longo de uma trajetória retilínea alinhada ou paralela ao eixo da máquina (FERRARESI, 1995).

Na indústria, é comum que a grande maioria das peças necessite de furos para sua montagem, integração ou funcionalidade. Em muitos casos apenas uma pequena porcentagem dessas peças já possui furos pré-existent de um processo anterior de fabricação seja corte, fundição, forjamento ou outros métodos similares (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

O processo de furação é significativo na manufatura por usinagem, representando cerca de 30% de todos os processos (LÓPEZ et al., 2008), além de demandar um tempo considerável, conforme ilustrado na Figura 2.

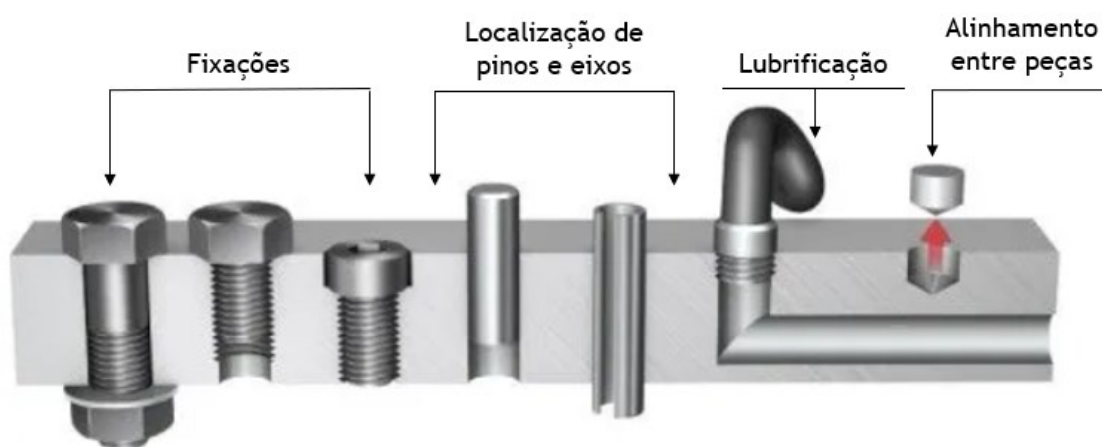
Figura 2 - Distribuição dos processos (a) e tempos de usinagem (b)



Fonte: Adaptado de López de Lacalle et al. (2011)

Entre os setores industriais que comumente utilizam o processo de furação, destacam-se a indústria aeronáutica, automobilística, aeroespacial, fabricação de moldes e matrizes, assim como a produção de equipamentos eletrônicos, abrangendo também as áreas médicas e domésticas. Cada um desses setores demanda pelo menos um método específico de perfuração aplicado em uma peça, demonstrando a versatilidade e a relevância desse processo na fabricação moderna. Além disso, a maioria das peças industriais passa por uma série de etapas de fabricação e montagem, onde são integradas a outras peças ou componentes para formar sistemas mais complexos. Na Figura 3 é demonstrado o papel crucial da furação e suas etapas, permitindo a conexão, fixação e passagem de elementos necessários para o funcionamento adequado dos produtos.

Figura 3 - Aplicações de furação



Fonte – Adaptado SANDVIK COROMANT

No processo de furação, a ferramenta de corte atua sobre a peça, com a broca desempenhando o papel principal na criação do furo. A broca realiza um movimento de rotação e simultaneamente se desloca em linha reta, perpendicular à superfície da peça, para criar o furo desejado (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO et al., 2015).

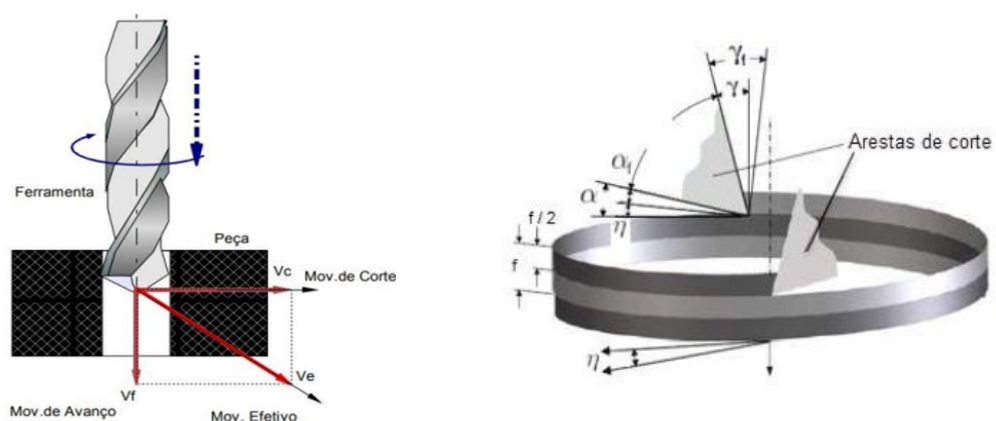
Os movimentos que definem a ocorrência do processo de usinagem podem variar dependendo do tipo específico de usinagem a ser realizada. No entanto, geralmente, os principais movimentos envolvidos incluem (STEMMER, 2008):

a) Movimento de corte: é o movimento principal da ferramenta de corte em relação à peça de trabalho. Pode ser um movimento de rotação, como no caso de tornear, fresar ou um movimento linear, como no caso de brochar ou furar.

- b) Movimento de avanço: é responsável por fazer a ferramenta de corte avançar em direção à peça de trabalho durante o processo de usinagem. Ele determina a taxa na qual o material é removido e influencia diretamente na rugosidade da superfície usinada.
- c) Velocidade de Corte (V_c): é a velocidade momentânea do movimento principal no ponto específico do gume.
- d) Velocidade de avanço (V_f): é a velocidade instantânea do deslocamento do ponto selecionado da borda em relação à peça.
- e) Direção do movimento de corte: é o sentido momentâneo do movimento de corte no ponto específico de usinagem.
- f) Direção do movimento de avanço: é a direção instantânea do deslocamento do ponto selecionado da borda em relação à peça.
- g) Movimento resultante de corte: é a resultante dos movimentos de corte e avanço.
- h) Direção resultante de corte: é a direção instantânea do movimento resultante de corte, no ponto selecionado do gume, em relação à peça.
- i) Velocidade resultante de corte (V_e): é a velocidade instantânea do movimento resultante da ferramenta em relação à peça.
- j) Ângulo da direção de avanço (ϕ): é o ângulo entre as direções dos movimentos simultâneos de avanço e de corte.
- k) Ângulo da direção resultante de corte (η): é o ângulo entre a direção do movimento de corte e a direção resultante de corte.

A Figura 4 mostra as direções dos movimentos resultantes e representa o gume de corte de uma broca ataca o material com seus respectivos ângulos.

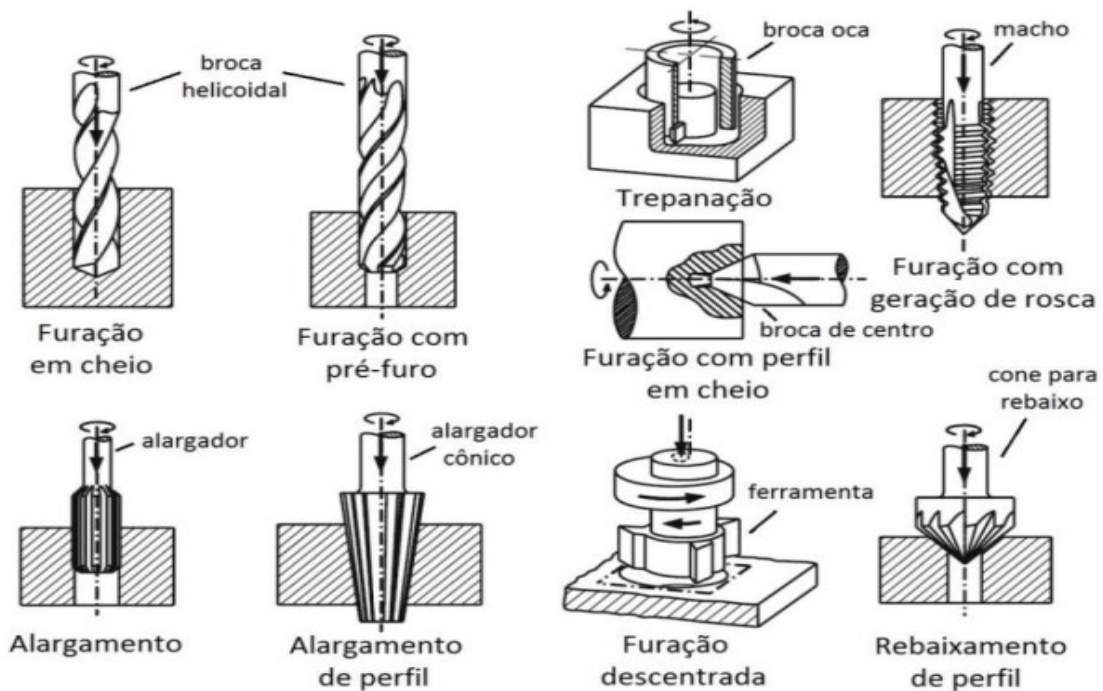
Figura 4 - Condições cinemáticas de furação (movimento ferramenta e peça)



Fonte: Adaptado Stoeterau (2007); Stemmer (2008); Klocke et al. (2011)

Para garantir as tolerâncias dimensionais exigidas, complexidade da geometria do furo, funcionalidade, montagem e integração eficientes das peças em sistemas e produtos, existem diversas categorias de furação, incluindo furação em cheio, escareamento, escalonada, de centros e trepanação, sendo a furação em cheio a técnica mais comum e amplamente utilizada.

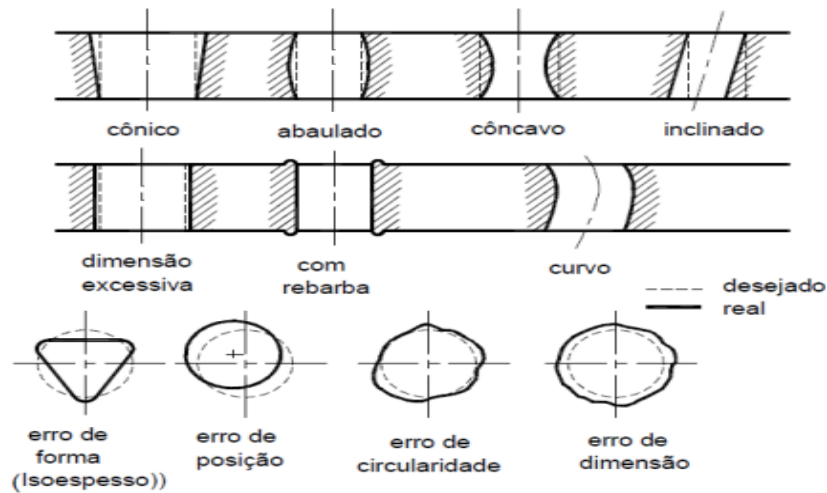
Figura 5 - Variáveis do processo de furação



Fonte: König e Klocke

A crescente demanda por eficiência na furação de aços estruturais, como o ASTM A572 GR50, motiva este estudo. A hipótese é que brocas helicoidais com ponteiros intercambiáveis proporcionam vantagens em ambientes industriais de alta produção. Zhang et al. (2022) e Klocke et al. (2023) destacam ganhos em *setup*, durabilidade e rendimento. Kühn et al. (2021) confirmam estabilidade dimensional e confiabilidade operacional. No entanto, esse processo pode ser suscetível a vários erros comuns que podem comprometer a qualidade do furo, seleção inadequada da ferramenta, parâmetros de corte incorretos, fixação insuficiente do conjunto, peça e a máquina. A Figura 6 apresenta alguns erros e imperfeições que podem ocorrer devido as condições do processo de furação com brocas helicoidais em materiais metálicos.

Figura 6 - Erros comuns na geometria dos furos

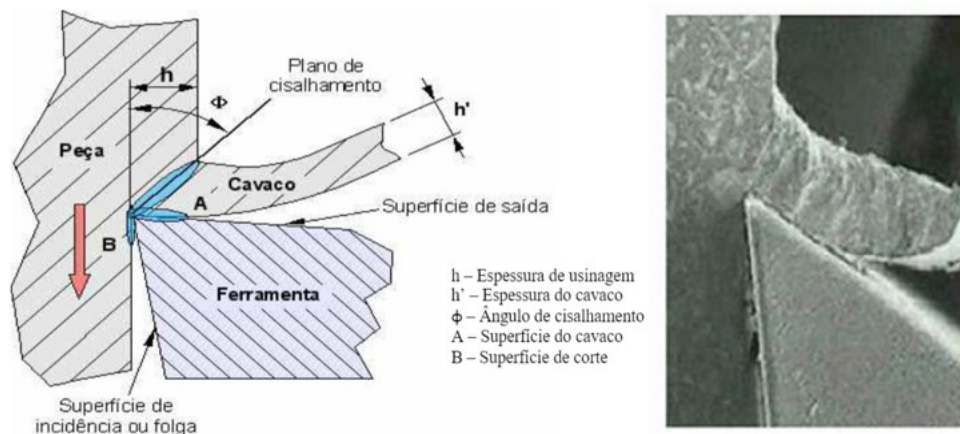


Fonte: Adaptado de Wick et al. (1988)

2.2 Formação de cavacos

A formação de cavacos ocorre devido ao cisalhamento intenso ao longo de um plano denominado plano de cisalhamento. Conforme a ferramenta avança, uma camada de material é deformada plasticamente e, eventualmente, se separa na forma de cavaco. O ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção de corte é conhecido como ângulo de cisalhamento (ϕ). Este ângulo desempenha um papel fundamental na determinação dos esforços de corte e da qualidade da superfície usinada ((DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 7 – Formação do cavaco no processo de usinagem de uma peça por uma ferramenta de corte indicando o plano de cisalhamento



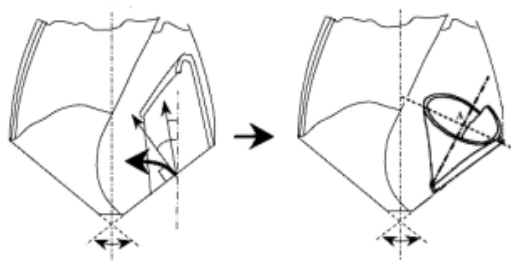
Fonte: Adaptado de FERRARESI (1977)

A formação de cavacos no processo de furação requer alguns ajustes devido à geometria das arestas de corte da broca. Ao contrário de outras operações de corte

onde a ação pode ocorrer de maneira oblíqua, na furação, a geometria da broca varia ao longo de sua extensão, influenciando fatores como o ângulo de saída. Essas variações geométricas ao longo da ferramenta impactam significativamente a forma e o comportamento dos cavacos durante a operação, exigindo um ajuste cuidadoso para otimizar a eficiência do processo (Guibert et al., 2009; Bordin, 2013).

Os cavacos na furação geralmente se iniciam no centro da broca. Algumas diferenças são destacadas por Ke et al., (2005) relacionado a formação contínua do cavaco na furação, quando comparada a outros processos. A principal diferença está na formação do cavaco, que não se completa na saída da aresta principal, permanecendo deformado nas interações com o canal da broca. Esse comportamento depende do ângulo de ponta e da geometria do canal (ângulo de hélice), além da interação com a parede do furo. Outra diferença significativa ocorre no fluxo do cavaco durante o processo de furação. Devido à variação da velocidade de corte ao longo das arestas, o cavaco inicialmente assume um formato cônico, movendo-se em direção ao centro do furo e mantendo uma forma espiral característica (figura 8, adaptada de Ke et al., 2005). No entanto, se o material não demonstrar ductilidade suficiente ou apresentar alto grau de encruamento, o cavaco pode quebrar-se ou ser forçado a mover-se pelo canal sem girar, resultando na formação de um cavaco em fita. Conforme discutido por Ke et al. (2005), o sucesso da operação de furação está diretamente relacionado à capacidade de produzir cavacos que possam ser facilmente removidos do furo durante o processo de usinagem.

Figura 8 - Representação das formas iniciais do cavaco formado em uma broca



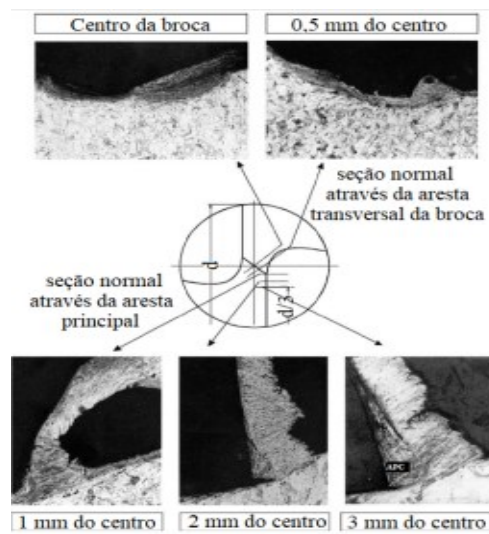
Fonte: Adaptado de KE et al, (2005)

Dolinsek (2003) contribui para a compreensão da formação do cavaco durante a furação do material AISI 321, utilizando micrografias que detalham o papel de cada parte da aresta de corte no processo (Figura 9). As imagens sequenciais revelam que o processo de formação do cavaco se inicia com intensa deformação plástica,

influenciada pela baixa velocidade de corte e alta força de avanço na aresta transversal da broca.

Inicialmente, o cavaco forma-se com uma espessura reduzida, mas vai se tornando mais espesso à medida que avança ao longo da superfície de saída da broca. Parte desse cavaco, que é fina e encruada, passa pelo centro da broca e pode formar aresta postiça de corte.

Figura 9 - Micrografias dos cavacos a diferentes distâncias do centro da broca



Fonte: Adaptada de Dolinsek (2003)

Já o estudo experimental realizado por Xu et al. (2019) sobre o formato do cavaco em torneamento assistido por vibração ultrassônica de aço inoxidável austenítico 304, revelou que a vibração ultrassônica melhora significativamente a qualidade dos cavacos, reduzindo defeitos e rebarbas serrilhadas. Sob condições adequadas de vibração e corte, demonstrando maior eficiência em relação ao torneamento convencional, otimizando o controle dos cavacos e a qualidade do processo de usinagem.

Essas observações destacam como diferentes condições de corte e características do material influenciam diretamente na morfologia e no comportamento do cavaco durante a operação de furação.

2.2.1 Tipos e formas de Cavacos

O tipo de cavaco gerado não apenas afeta a eficiência do processo de usinagem, mas também influencia a qualidade da superfície da peça usinada e a vida útil da ferramenta de corte utilizada.

Durante o processo de usinagem, uma nova superfície na peça é gerada pela remoção de material na forma de cavacos. Morfologicamente, os cavacos são classificados em determinados tipos de categorias: contínuos, descontínuos e segmentados.

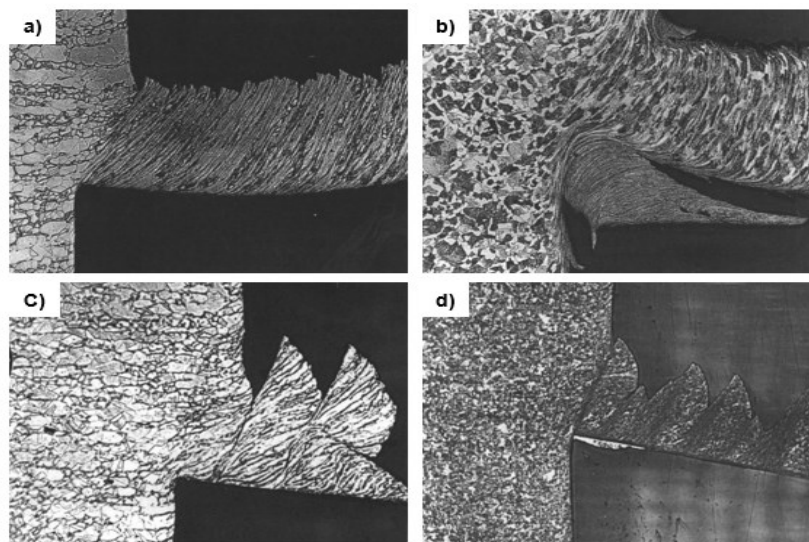
Cavacos contínuos: são típicos em materiais dúcteis, onde a deformação plástica permite a formação de um fluxo contínuo de material sendo removido. Esse tipo de cavaco mantém sua integridade ao longo do processo de usinagem.

Cavacos parcialmente contínuos: É um tipo intermediário entre os contínuos e os descontínuos, no qual a trinca se propaga parcialmente pela extensão do plano de cisalhamento. É, muitas vezes, denominado cavaco de cisalhamento.

Cavacos descontínuos (ruptura): são comuns em materiais frágeis, onde a remoção de material resulta na formação de elementos de cavacos quebrados em pedaços. Nesses casos, a fragilidade do material faz com que ele se quebre em pequenos segmentos durante a operação de corte.

Cavacos segmentados: podem ocorrer em materiais que apresentam comportamento misto entre dúctil e frágil, ou em situações em que a usinagem envolve condições variáveis que causam interrupções no fluxo do cavaco. Na Figura 10 demonstra os tipos de cada cavaco gerados.

Figura 10 - Tipos de cavacos - a) Contínuos; b) Parcialmente contínuos; c) Descontínuos; d) Segmentados

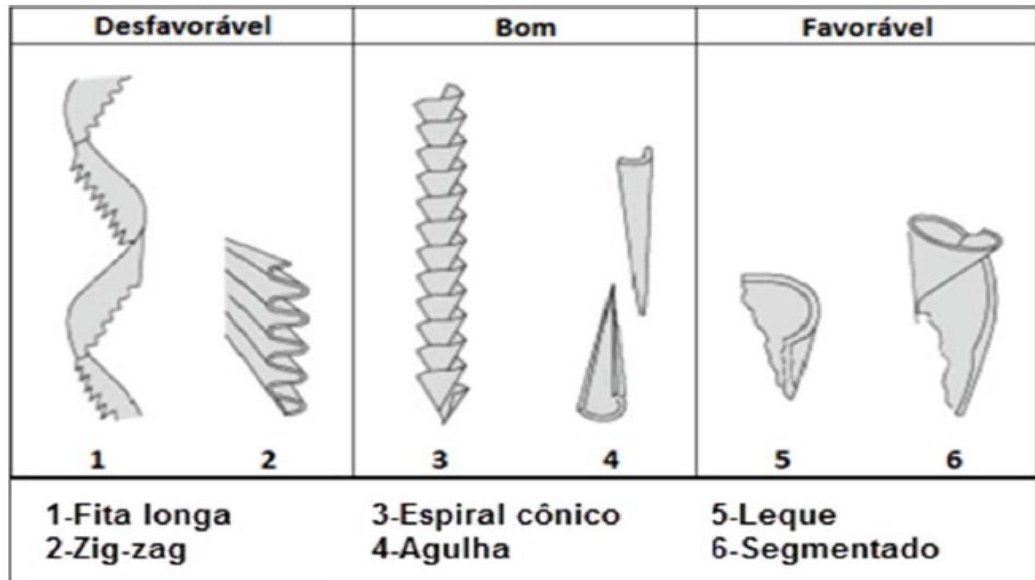


Fonte: Adaptado Trent; Wright (2000)

Quanto ao formato dos cavacos no ambiente industrial, torna-se preferível os que possam ser removidos facilmente e rapidamente. Isso não só otimiza o processo

de usinagem, mas também reduz a transferência de calor para a peça e a máquina, o que é crucial para preservar a integridade e a precisão das peças usinadas (KLOCKE et al., 2011; STEMMER, 2008). Na Figura 11 é demonstrado os diferentes formatos de cavacos no processo de furação.

Figura 11 - Formas de cavacos de um processo de furação.



Fonte: Adaptado Mitsubishi (2015)

As formas de cavacos longos são as que mais preocupam em termos de segurança e produtividade, exigindo cuidados especiais e atenção rigorosa no controle do processo. Embora os parâmetros de corte geralmente possam ser ajustados para evitar ou reduzir a formação de cavacos longos, o método mais eficaz para produzir cavacos curtos é o uso de quebra-cavacos.

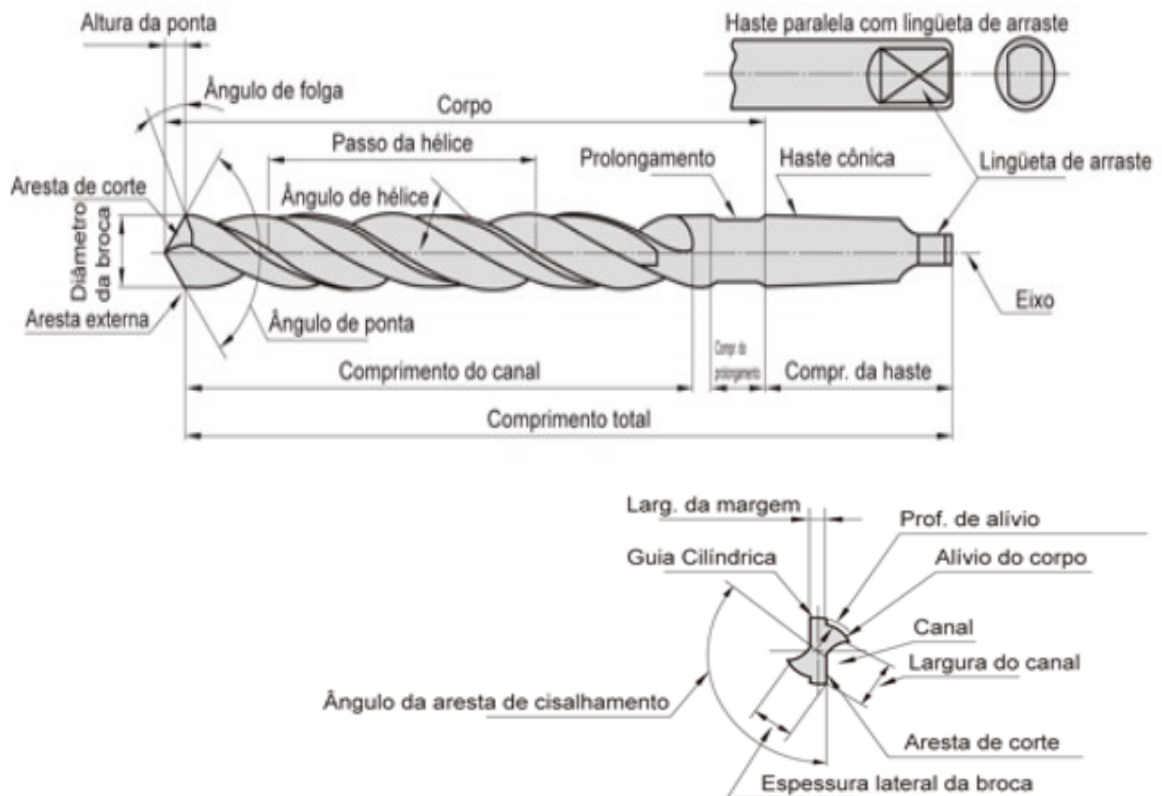
2.3 Brocas helicoidais

O processo de furação convencional com brocas helicoidais depende de diversas características do processo, incluindo a dimensão do furo, o tipo de furo (cego ou passante), a relação entre o diâmetro e a profundidade do furo (L/D), a qualidade do furo (tolerâncias dimensionais e geométricas, além do acabamento superficial), a quantidade de furos a serem realizados e as propriedades do material a ser usinado, entre outros fatores (Sandvik, 2012).

A norma ABNT NBR ISO 5419 é uma referência importante para a definição dos termos, tipos e especificações das brocas helicoidais. Essa norma serve como

base para a fabricação de brocas de aço rápido e metal duro, que são amplamente utilizadas na indústria. As brocas helicoidais possuem uma geometria específica e diversos elementos que são padronizados conforme essa norma. As características de uma broca helicoidal são apresentadas na Figura 12.

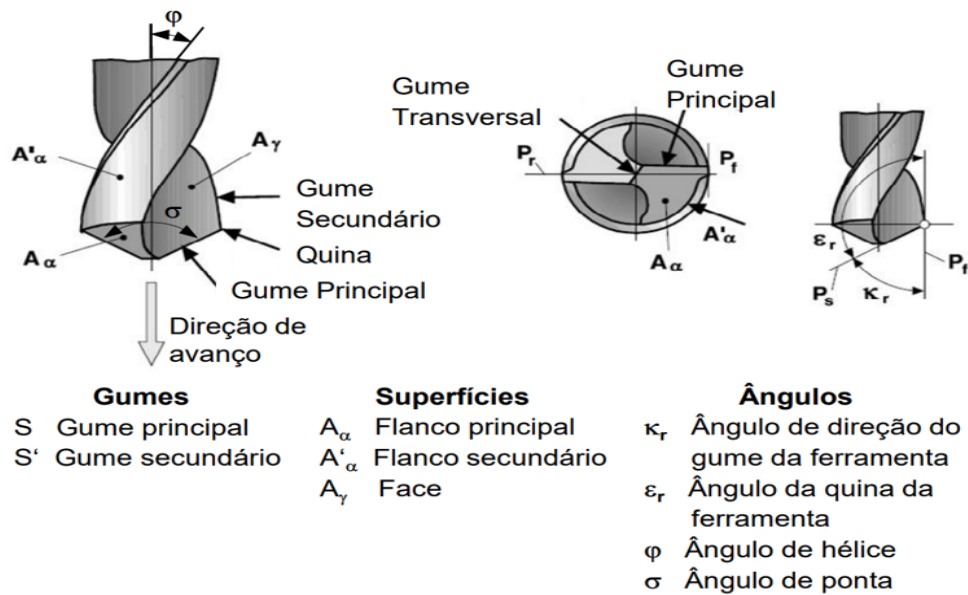
Figura 12 - Terminologia de brocas helicoidais com haste cilíndrica



Fonte: Adaptado Mitsubishi Materials (2013)

A geometria da parte cortante de uma broca helicoidal com a devida nomenclatura segundo as normas DIN 6581 (1985) e DIN ISO 5419 (1998) é visto na Figura 13. Estão definidos os gumes principais, gumes secundários, ângulo de ponta, ângulo de saída do cavaco, ângulo de cunha, ângulo de incidência, além de outros aspectos.

Figura 13 - Geometria da broca helicoidal (DIN 6581)



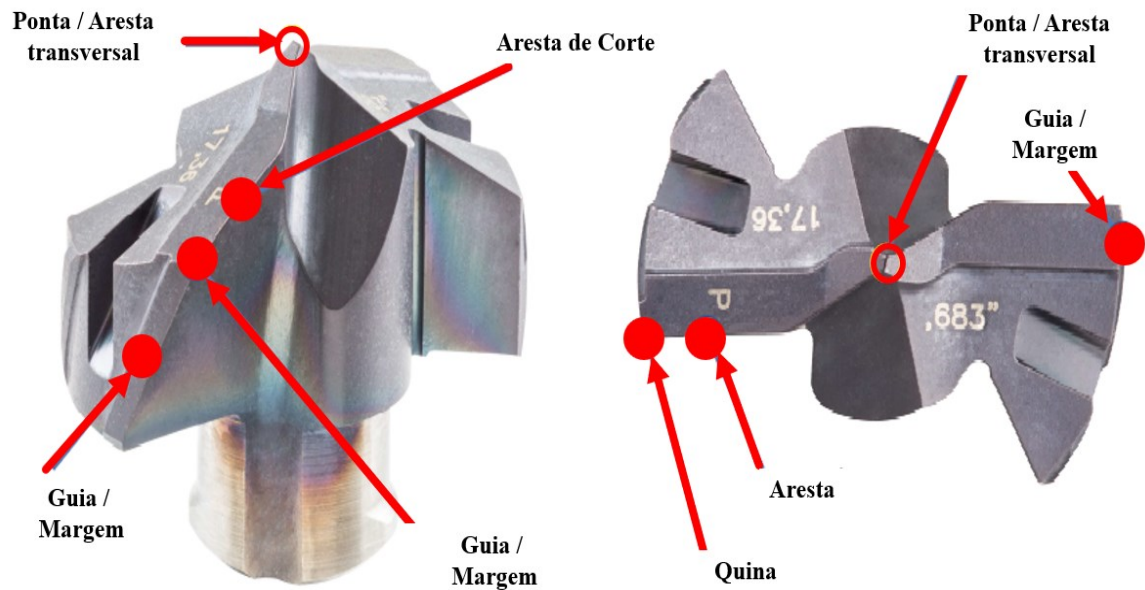
Fonte: Universidade técnica de Munique (TU-München)

Já as brocas helicoidais intercambiáveis são projetadas para maximizar a eficiência do corte e a remoção de cavacos. A hélice da broca facilita a evacuação dos cavacos, enquanto a ponteira intercambiável permite o uso de diferentes materiais de corte, como carbeto de tungstênio ou diamante policristalino (PCD), dependendo do material da peça de trabalho (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; ISCAR, 2026).

Os mecanismos de corte em brocas helicoidais intercambiáveis são semelhantes aos das brocas helicoidais convencionais, mas a presença da ponteira intercambiável adiciona complexidade. A interface entre a ponteira e o corpo da broca deve ser firme para evitar vibrações e desalinhamentos, que podem comprometer a qualidade do furo. A teoria do corte analisa a interação entre a ponteira e o material da peça, considerando a formação de cavacos, a geração de calor e as forças de corte (JOHNSON; KIM, 2020).

A Figura 14 ilustra os elementos essenciais e funcionais de ponteiras intercambiáveis autocentrantes.

Figura 14 - Elementos Ponteiras Intercambiáveis

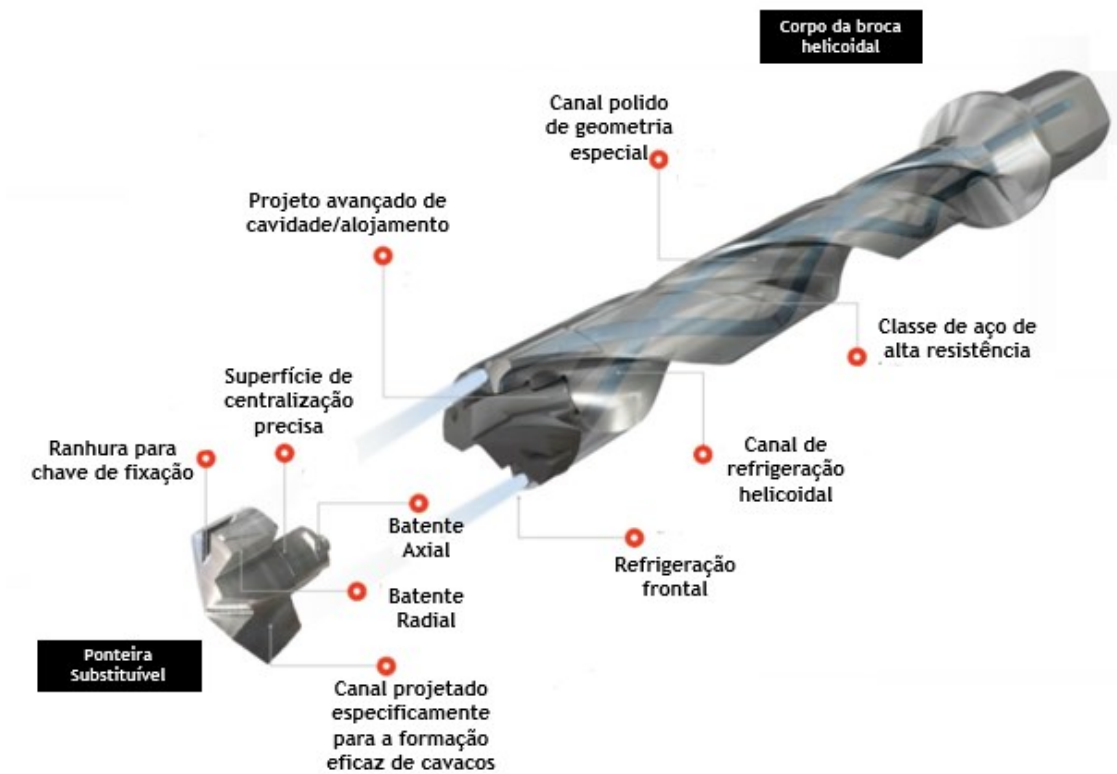


Fonte: Adaptado site Iscar (2024)

Ferramentas intercambiáveis são formadas por um corpo de aço, onde são fixados os inserts de diversos materiais (metal duro, cerâmica, diamantes policristalinos, nitreto cúbico de boro) dependendo do material a ser usinado (GROOVER, 2019). Essa diversidade de materiais está diretamente relacionada às propriedades mecânicas e térmicas exigidas no processo de corte. Dessa forma, a seleção adequada do inserto influencia diretamente no desempenho da ferramenta e na qualidade final da usinagem.

O modelo de brocas helicoidais intercambiáveis com pontas é demonstrado na Figura 15, evidenciando toda a sua estrutura. Esse sistema é composto por um corpo de broca reutilizável e pontas substituíveis, permitindo maior flexibilidade operacional e redução de custos. A geometria das pontas exerce influência direta no desempenho do processo, afetando parâmetros como estabilidade, qualidade superficial e precisão dimensional. Além disso, a possibilidade de substituição apenas da ponta contribui para a otimização do tempo de setup e manutenção do processo de usinagem. Dessa forma, esse tipo de ferramenta se destaca em aplicações industriais que demandam produtividade e repetibilidade.

Figura 15 - Estrutura da broca helicoidal intercambiável Sumocham



Fonte: Adaptado site Iscar (2024)

A broca helicoidal é uma ferramenta padronizada com base em suas características construtivas e geométricas (DIN 1836, 1962; ABNT PB-286, 1977). Dependendo dessas características e de sua aplicação na usinagem de materiais, as brocas helicoidais são classificadas em três tipos de hélice conforme as normas:

- **Tipo W (Passo curto)**: recomendado para materiais que formam cavacos longos, como ligas de alumínio e magnésio. A hélice curta ajuda a quebrar os cavacos longos, evitando que se enroscem na ferramenta e no material usinado.
- **Tipo N (Passo normal)**: Ideal para materiais comuns, como aços e ferros fundidos. Este tipo é versátil e adequado para uma ampla gama de aplicações de usinagem, oferecendo um bom equilíbrio entre remoção de material e evacuação de cavacos.
- **Tipo H (Passo longo)**: Recomendado para materiais que formam cavacos curtos, como ligas de cobre, ligas de zinco, borracha dura, baquelite e certos materiais plásticos. A hélice longa facilita a remoção rápida dos cavacos pequenos, evitando o entupimento e garantindo uma superfície usinada limpa.

A Tabela 1 considerada pelo fabricante ISCAR segue a classificação ISO para definição dos padrões a serem utilizados no processo, conforme o material a ser usinado, sendo no presente estudo a condição de aço (classe P).

Tabela 1¹ - Condições recomendadas para usinagem fabricante ISCAR

Especificações da Matéria Prima				Condições Recomendadas de usinagem										
Material	Condição	Resistência a tração	Dureza HB	Vc (m/min)	mm/rev									
					D=4 a 4,9mm	D=5 a 5,9mm	D=6 a 7,9mm	D=8 a 9,9mm	D=10 a 11,9mm	D=12 a 13,9mm	D=14 a 15,9mm	D=16 a 19,9mm	D=20 a 25,9mm	D=26 a 32,9mm
< 0,25%C	Recozido	420	125	80-110-140										
≥ 0,25%C	Recozido	650	190	80-105-130	0.04	0.07	0.09	0.12	0.15	0.18	0.20	0.25	0.25	0.30
< 0,55%C	Tempera e Revenimento	850	250	80-100-120	0.06	0.09	0.11	0.17	0.21	0.24	0.27	0.35	0.35	0.40
≥ 0,55%C	Recozido	750	220	70-90-110	0.08	0.11	0.13	0.22	0.28	0.30	0.35	0.45	0.45	0.50
	Tempera e Revenimento	1000	300	50-70-90										

Parâmetros utilizados na pesquisa com base na matéria prima a ser usinada

Fonte: Adaptado site Iscar (2024)

Os parâmetros a serem determinados baseiam-se na porcentagem de carbono (%C) presente no material a ser usinado, na sua condição metalúrgica (recozido, temperado, ferrítico, martensítico) e na dureza do material (HB). A partir dessas características, serão estabelecidos os valores adequados para a velocidade de corte e o avanço, garantindo que permaneçam dentro dos limites máximo e mínimo, conforme o diâmetro da furação a ser executada.

2.3.1 Materiais utilizados na fabricação de brocas

A escolha dos materiais utilizados na fabricação de ferramentas é crucial para garantir o desempenho, durabilidade e eficiência das ferramentas em diferentes aplicações. De acordo com Machado et al. (2009), as principais propriedades que o material de ferramenta de corte deve possuir são:

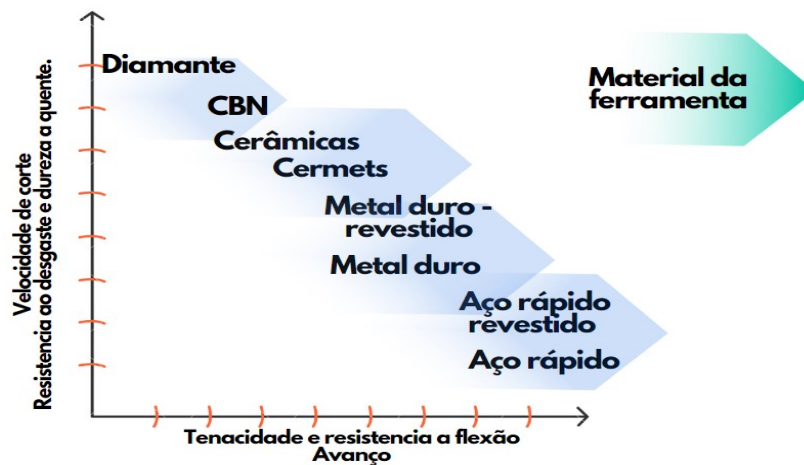
- dureza elevada;
- tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- alta resistência à compressão;
- alta resistência ao cisalhamento;
- boas propriedades mecânicas e térmicas a temperaturas elevadas;
- alta resistência ao choque térmico;

¹ Tabela 1 – Propriedades recomendadas pelo fabricante.

- g) alta resistência ao impacto;
- h) ser inerte quimicamente.

É comum encontrar ferramentas confeccionadas a partir de materiais como aço rápido, metal-duro, cermets, cerâmicas, CBN e diamante, com a possibilidade de serem revestidas ou não, conforme apontado por König e Klocke (1997). A Figura 16 ilustra a relação entre esses materiais.

Figura 16 - Dados de materiais utilizados na fabricação de brocas helicoidais



Fonte: Adaptado klocke et al. (2011)

Os materiais mais utilizados na fabricação de brocas são o aço-rápido (HSS) e o metal duro (carbeto de tungstênio). De acordo com De Castro (2001), aproximadamente 80% das ferramentas utilizadas em processos de furação eram fabricadas em aço-rápido, devido principalmente ao seu menor custo e à elevada tenacidade do material. Entretanto, esse cenário tem se modificado significativamente nas últimas décadas em função do desenvolvimento de novos materiais de corte e tecnologias de revestimento. Atualmente, ferramentas de metal duro e ferramentas com insertos indexáveis têm sido cada vez mais empregadas em operações de furação, especialmente em aplicações industriais que demandam maiores velocidades de corte e maior vida útil da ferramenta. Estudos recentes indicam que ferramentas de metal duro podem operar em velocidades de corte entre duas e cinco vezes superiores às ferramentas de aço-rápido, além de apresentarem maior resistência ao desgaste e maior estabilidade térmica durante o processo de usinagem (Davim, 2019; Ehsan et al., 2025).

O uso do aço-rápido (HSS) ainda representa uma parcela significativa do mercado de ferramentas de corte, especialmente em operações de furação e rosqueamento. Segundo dados do portal técnico da SteelPro Group (2025), o aço rápido corresponde atualmente a 40% a 50% do mercado, com predominância em oficinas convencionais e aplicações de baixa rotação. Em contrapartida, ferramentas de metal duro (carbeto de tungstênio) vêm ganhando destaque, principalmente em indústrias de alto desempenho, como a automotiva e aeroespacial, representando de 45% a 55% das ferramentas em uso (KHAN et al., 2022). Estudos experimentais indicam que brocas de metal duro apresentam maior resistência ao desgaste e vida útil em comparação às de aço rápido, especialmente na furação a seco, favorecendo sua aplicação industrial. Entretanto, o aço rápido ainda é amplamente utilizado devido ao menor custo, versatilidade e possibilidade de aplicação de revestimentos como TiN, TiCN e TiAlN para aumentar sua durabilidade (KÖNIG; KLOCKE, 1997; KLOCKE, 2011; MACHADO et al., 2015).

2.3.2 Brocas de aço rápido

As brocas de aço rápido são amplamente utilizadas em aplicações de perfuração devido à sua excelente combinação de dureza, resistência ao desgaste e capacidade de suportar altas temperaturas geradas durante o processo de perfuração.

Na virada do século XIX, ocorreram importantes avanços nas tecnologias relacionadas aos materiais de ferramentas de corte, especialmente com a descoberta das ferramentas de aço rápido (HSS). Até então, eram utilizadas ferramentas de aço-carbono, que permitiam velocidades de corte de apenas 3 a 5m/min, com a introdução das ferramentas de aço rápido, as velocidades de corte aumentaram significativamente para 30 a 35 m/min, aproximadamente 10 vezes mais rápidas que as ferramentas anteriores (MACHADO, ABRÃO, COELHO, SILVA, 2011).

O aço rápido normalmente apresenta uma faixa de carbono entre 0,70% e 1,40%. Esse conteúdo de carbono é crucial para conferir ao aço suas propriedades de dureza e resistência ao desgaste, características essenciais para ferramentas de corte de alta performance. Além do carbono, o aço rápido geralmente contém outros elementos de liga como tungstênio, molibdênio, cobalto e vanádio, que contribuem para a sua capacidade de manter a dureza em altas temperaturas e melhorar a resistência ao desgaste e à abrasão (Zhang & Wang, 2023).

Pesquisas recentes estão explorando novas ligas e tratamentos térmicos para otimizar as propriedades do aço rápido. A adição de elementos como cobalto e vanádio está sendo investigada para melhorar a resistência ao desgaste e a tenacidade das brocas HSS (Kim & Lee, 2022). Tratamentos térmicos avançados, como têmpera e revenido controlados, estão sendo refinados para maximizar a dureza e a durabilidade das brocas (Zhang & Wang, 2023).

O aprimoramento da geometria das brocas HSS está em grande relevância atualmente, incluindo alterações nos ângulos de afiação e nos formatos das espiras. O objetivo é melhorar a eficiência de perfuração, reduzir o calor gerado e otimizar a remoção de cavacos (Kumar & Singh, 2024).

2.3.3 Brocas de Metal Duro

O carboneto de titânio (TiC) e o carboneto de tântalo (TaC) foram adicionados às ferramentas de usinagem para aprimorar suas propriedades mecânicas ao trabalhar com aços (GROOVER, 2019).

A partir disso, surgiram dois grupos principais de metais duros: o primeiro grupo, composto por WC-Co, que não é indicado para a usinagem de aços, mas é adequado para a usinagem de materiais não ferrosos, como alumínio, latão e bronze; e o segundo grupo, indicado para a usinagem de aços, composto por WC-Co combinado com TiC e TaC (GROOVER, 2019).

Atualmente a norma ISO classifica os metais duros em classes, de acordo com o material da peça a ser usinado (SANTOS, SALES, 2007):

- Classe P: Aços;
- Classe M: Aços inoxidáveis;
- Classe K: Ferro fundido;
- Classe N: Alumínio;
- Classe H: Aços endurecidos;
- Classe S: Superligas.

A subdivisão dentro de cada classe depende principalmente de vários fatores, conforme explicado por Machado, Abrão, Coelho e Silva (2011). Esses fatores incluem a composição química, a qualidade e a quantidade de carbonetos presentes no material. Além disso, o tamanho dos grãos desempenha um papel crucial: grãos mais

finos resultam em maior tenacidade da ferramenta, combinada com uma dureza média (MACHADO et al., 2011).

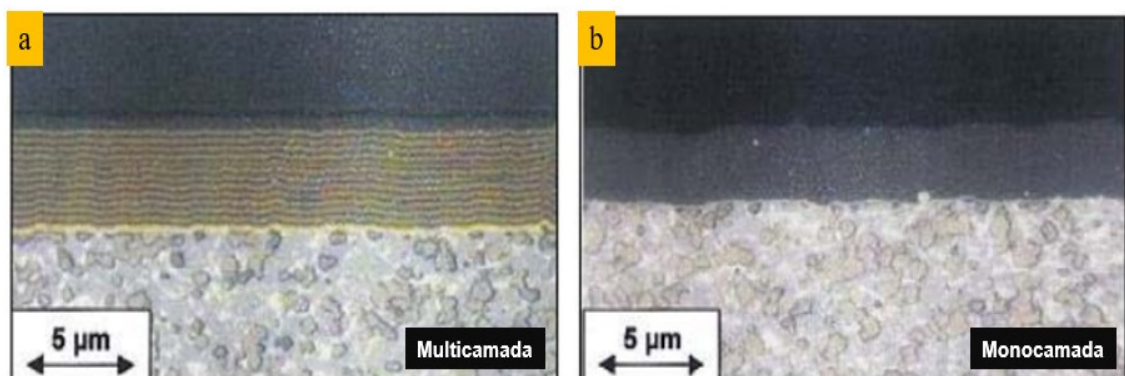
2.3.4 Revestimento

Para brocas helicoidais intercambiáveis, os processos de revestimento como CVD (deposição química na fase de vapor) e PVD (deposição física na fase de vapor) são cruciais para garantir a durabilidade e eficiência das ferramentas de corte.

O processo de CVD é normalmente realizado em temperaturas que variam entre 900 e 1100°C. A elevada temperatura do processo muitas vezes inibe o revestimento de materiais mais susceptíveis a altas temperaturas, como o aço rápido. Entretanto para o metal duro o processo se torna perfeitamente adequado e permite uma boa difusão entre o revestimento e o substrato. Durante o CVD, gases reativos são introduzidos em uma câmara onde se decompõem e formam um revestimento sólido sobre a superfície da ferramenta. Este método é amplamente utilizado para aplicar revestimentos como TiN, TiCN e Al_2O_3 , conhecidos por suas excelentes propriedades de dureza e resistência ao desgaste (SANDVICK COROMANT, 2023).

O processo de PVD é realizado a temperaturas mais baixas em comparação com o CVD, geralmente abaixo de 500°C. A Figura 17 demonstra o revestimento em PVD, um material alvo é vaporizado em um ambiente de vácuo e depositado sobre a superfície da ferramenta. Este método é ideal para a aplicação de revestimentos finos e uniformes, como TiN, AlTiN e revestimentos de diamante, proporcionando alta aderência e resistência ao desgaste (KENNAMETAL, 2024).

Figura 17 - Revestimento PVD sobre o metal duro a) TiAlN multicamada; b) TiAlN monocamada



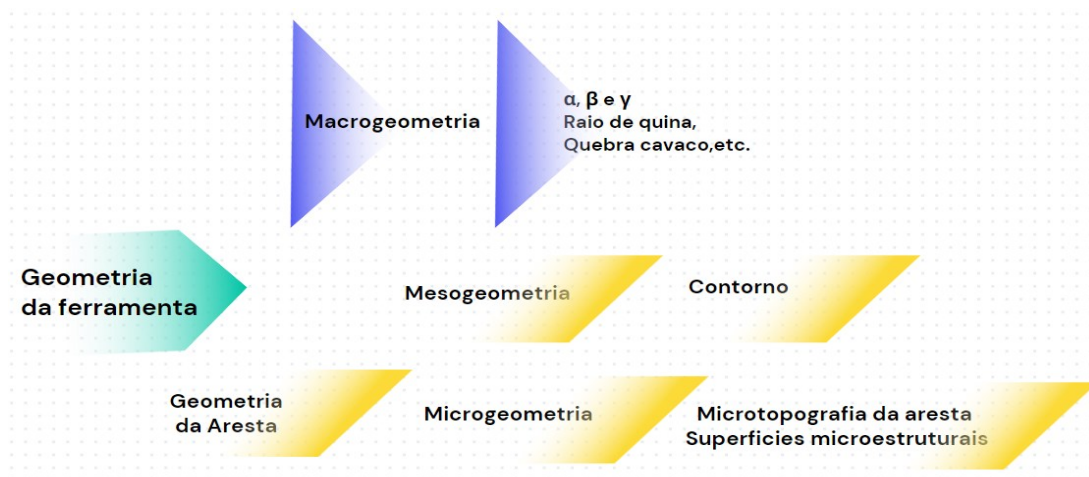
Fonte: Adaptado de Mocellin (2002)

2.3.5 Influência da geometria da ferramenta no processo

A geometria da ferramenta exerce papel fundamental no desempenho do processo de usinagem, influenciando diretamente parâmetros como forças de corte, formação do cavaco, geração de calor e mecanismos de desgaste da ferramenta. Elementos geométricos como ângulo de saída, ângulo de hélice, raio da aresta de corte e preparação da aresta influenciam significativamente a distribuição das tensões na zona de corte e, conseqüentemente, a estabilidade do processo e a qualidade superficial obtida. Estudos recentes demonstram que a otimização da microgeometria da aresta de corte pode reduzir forças de corte, melhorar a integridade superficial e retardar a progressão do desgaste da ferramenta. Nesse contexto, revisões recentes destacam que o projeto adequado da geometria da ferramenta, aliado à seleção apropriada do material e do revestimento, é um dos fatores mais relevantes para o aumento da vida útil da ferramenta e para a melhoria da eficiência dos processos de usinagem (Mativenga et al., 2024; Jawahir et al., 2024). Além disso, investigações experimentais indicam que variações em parâmetros geométricos, como o ângulo de saída e o raio da aresta de corte, podem alterar significativamente as forças de corte, o mecanismo de remoção de material e a integridade superficial da peça usinada (Malekan et al., 2025; Liu et al., 2024).

Segundo Rodriguez (2009), define-se a geometria da ferramenta de corte em: macrogeometria, mesogeometria e microgeometria. A Figura 18 apresenta as divisões da geometria de uma ferramenta.

Figura 18 - Aspectos relacionados a geometria da ferramenta de corte

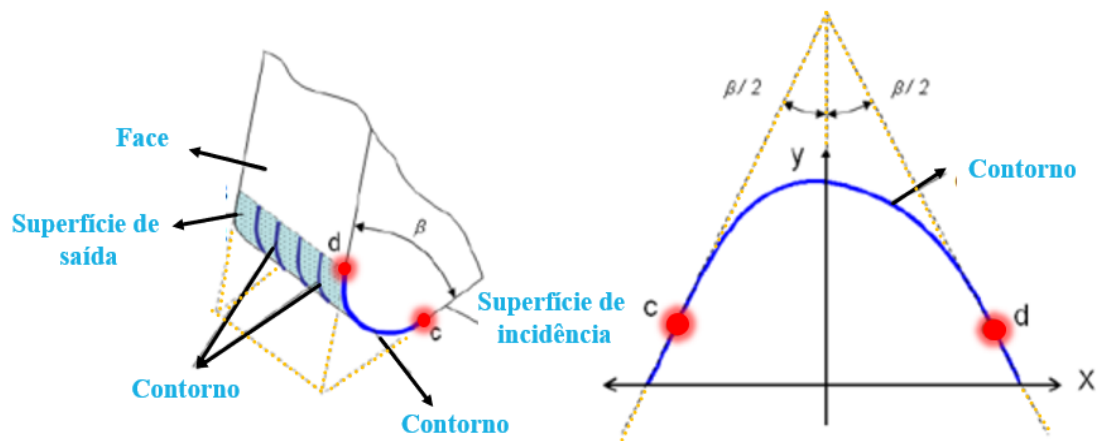


Fonte: Adaptado RODRÍGUEZ (2009)

A macrogeometria refere-se às características geométricas da ferramenta de corte que influenciam diretamente o processo de usinagem. Essas características têm um impacto significativo no escoamento do cavaco, na eficácia da lubrificação e na determinação de ângulos de corte, raios de quina, quebra-cavacos e outras superfícies importantes para o desempenho da ferramenta (RODRIGUEZ, 2009).

Na mesogeometria Figura 19, são analisados os contornos da superfície convexa do gume resultante dos processos de tratamento do gume, com uma ordem de magnitude variando entre 1 e 100 μm (RODRIGUEZ, 2009).

Figura 19 - Superfícies convexas geradas e contornos



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2009)

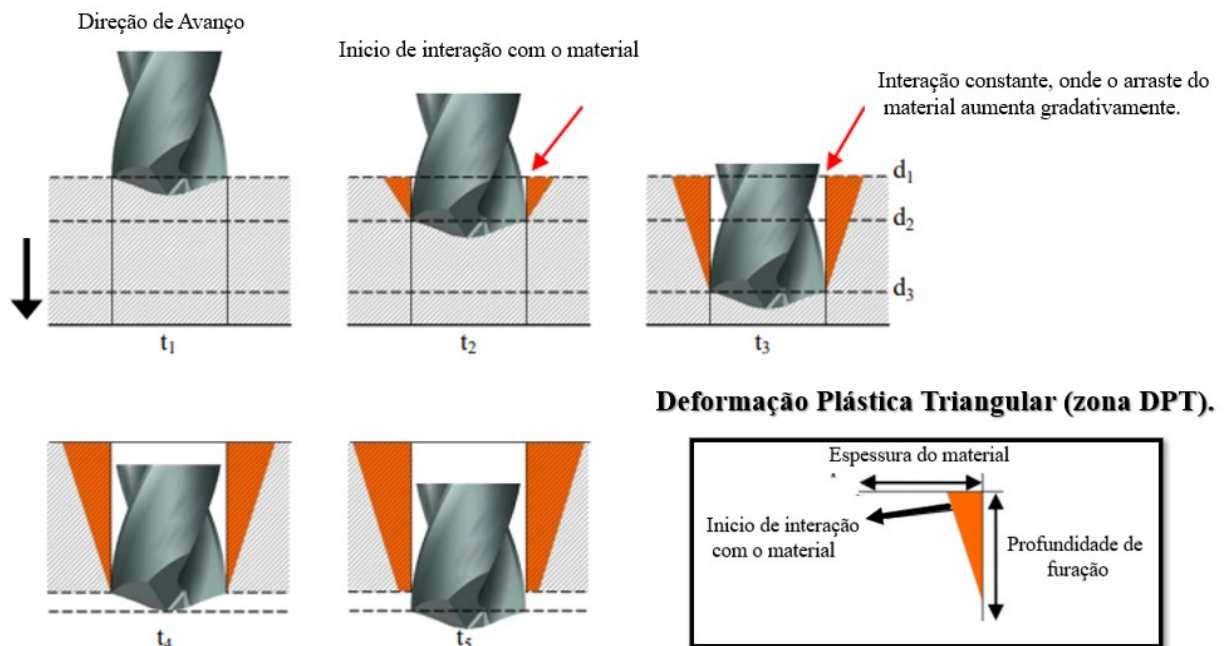
Na usinagem, as microgeometrias englobam a microtopografia do gume e a microtopografia das superfícies adjacentes ao gume (flanco e face), com detalhes em magnitudes inferiores a 1 μm (RODRIGUEZ, 2009; RECH, 2006).

Santana e Polli (2022) investigaram a influência da preparação da aresta de corte na vida útil de ferramentas durante a furação do aço SAE 4144M, comparando ferramentas com arestas afiadas e arestas com microarredondamento. Os autores observaram que arestas afiadas apresentam maior concentração de tensões na região do gume, favorecendo a ocorrência de lascamento e desgaste irregular. Em contrapartida, ferramentas com arestas preparadas apresentaram melhor distribuição de tensões na zona de corte e progressão de desgaste mais uniforme, resultando em maior estabilidade do processo e aumento da vida útil da ferramenta. Esses resultados

evidenciam a influência direta da geometria da aresta nos mecanismos de desgaste e no desempenho de ferramentas no processo de furação.

Para investigar a interação da geometria da ferramenta durante o processo, Kwong et al. (2009) dividiu o mecanismo de corte na interface guia e quina/material em diferentes estágios ($t_1 - t_5$), conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Estágios de interação da geometria da ferramenta com a superfície



Fonte: Adaptado de Kwong et al. (2009)

Durante a furação, a interação da ferramenta varia conforme os estágios: inicialmente, a ponta entra em contato e os gumes principais penetram na peça. O atrito causa arraste de material, mais intenso na entrada do furo. A "deformação plástica triangular" (DPT) descreve essa acumulação ao longo do tempo.

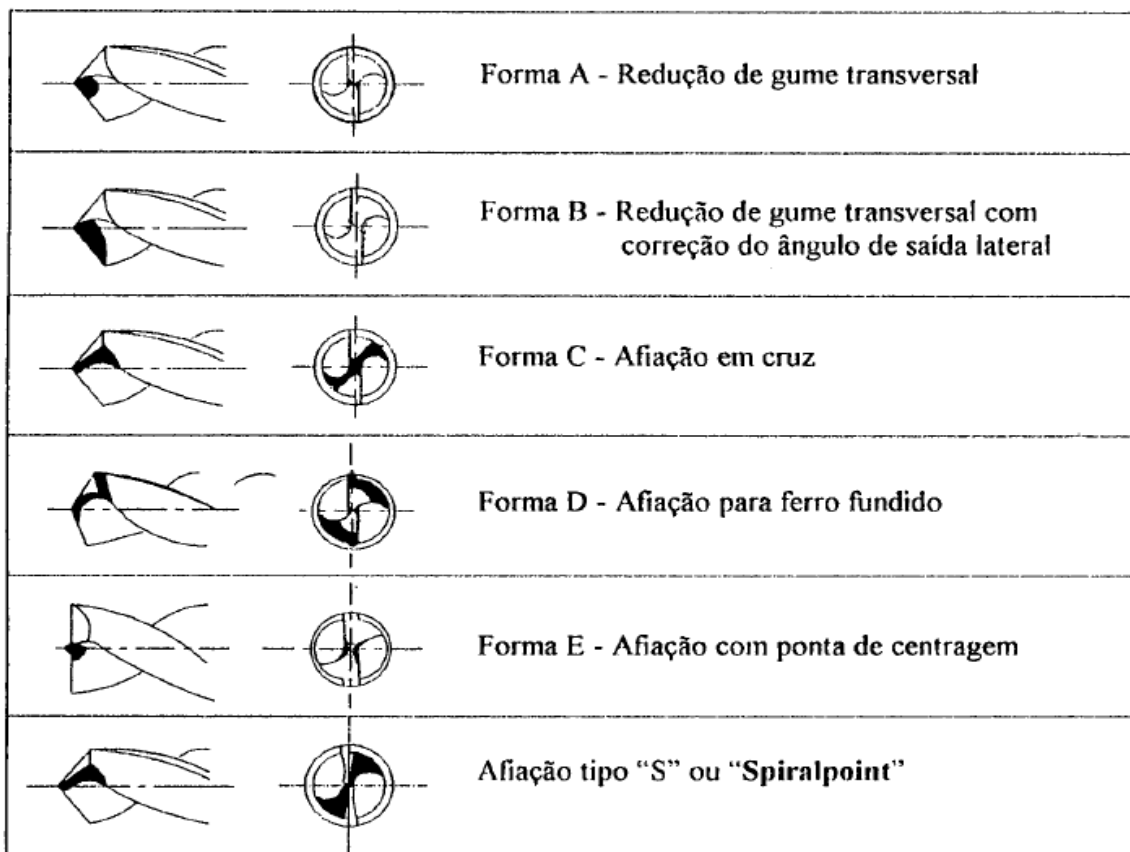
2.3.6 Tipos de afiação de uma broca helicoidal

Além da geometria padrão da broca helicoidal, é possível afiar sua ponta com diferentes finalidades, como a diminuição de desgastes localizados, aumento do efeito centrante da broca, diminuição do calor gerado, melhoria em cortes profundos e diminuição da força de avanço, entre outras (Thompson, 2018). Essas modificações podem melhorar a performance da broca em diversos aspectos do processo de furação, tornando-o mais eficiente e duradouro (Gomes et al., 2021).

Brocas helicoidais de aço rápido e inteiriças de metal duro necessitam de reafiação ao final de sua vida útil para manter a eficiência de corte. Esse processo é realizado com o uso de ferramentas abrasivas, fundamentais para a manutenção da geometria e dos gumes de corte (STEMMER, 2008)

Alguns tipos de afiação de brocas helicoidais desenvolvidos são ilustrados na Figura 21.

Figura 21 - Tipos de afiações



Fonte: Adaptado (SKF, 1988; STEMMER, 2008)

O gume transversal é responsável por uma parcela significativa da força de avanço. Logo, a afinação do gume transversal à medida que são realizadas afiações torna-se necessária, visto que ele tende a aumentar com as sucessivas reafiações, resultando em uma broca mais curta. Esse fenômeno ocorre porque os fabricantes aumentam o diâmetro do núcleo da broca em direção à haste para aumentar a rigidez torcional. Para reduzir a força de avanço, é feita uma retificação que cria uma reentrância na ponta da broca, diminuindo o gume transversal, como visto na forma A da Figura 21 (STEMMER, 1995).

Na correção do ângulo de saída juntamente com a afinação do gume transversal, conforme ilustrado na figura abaixo forma B, é feita uma retificação que

cria uma canaleta. Esta canaleta corrige o ângulo de saída da broca no centro e afina o gume principal simultaneamente, melhorando as condições de corte (STEMMER, 1995).

A afiação cruzada, conforme descrito por Stemmer (1995), envolve a retificação de um plano inclinado nas superfícies de incidência (flancos), eliminando parcial ou totalmente o gume transversal, como mostrado na figura acima forma C. Isso resulta na formação de dois novos gumes principais que formam um ângulo menor que 90° com o eixo principal, criando um efeito centrante na broca. Esse método é especialmente utilizado em brocas para furos profundos.

Na afiação de ponta secundária (forma D), além da ponta principal com ângulo de 118° , é criada uma segunda ponta com ângulo entre 80° e 90° . Esse tipo de afiação, recomendado para furar ferro fundido cinzento, visa reduzir o risco de superaquecimento nos gumes externos, onde a velocidade de corte é maior (STEMMER, 1995).

A afiação com ponta de centragem (forma E), é usada principalmente na furação de chapas. Conforme Astakhov (2014), o ângulo da ponta varia de 150° a 180° , dependendo da espessura da chapa. Ângulos maiores podem causar mais desgaste na periferia, recomendando-se um ângulo secundário de 90° em casos críticos. Esse tipo de afiação é indicado para furações rasas, com profundidade menor que duas vezes o diâmetro da broca.

A afiação tipo S possui uma aresta transversal em forma de 'S', proporcionando ângulos de saída menos negativos ao longo da aresta de corte quando comparada à afiação cônica. Essa geometria favorece a redução dos esforços de corte, melhora a qualidade geométrica dos furos e contribui para menor geração de calor na região de corte, podendo aumentar a vida útil da ferramenta (STEMMER, 2008; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

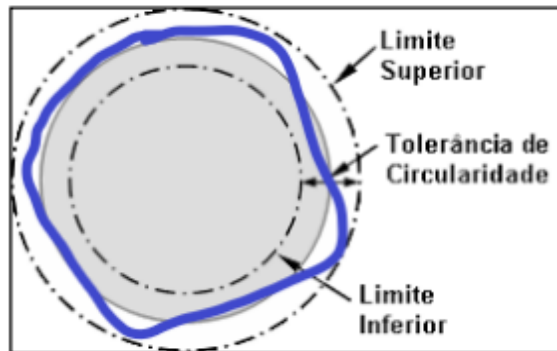
2.3.7 Tolerâncias Geométricas

Desvio de forma das superfícies reais com relação aos geométricos que os definem, micrométricos (rugosidade) e macrométricos (retilidade, circularidade, cilindridade e planicidade).

- a) Circularidade: é uma tolerância de forma macrogeométrica, definida pela distância entre dois círculos concêntricos na seção de medição de uma peça. Conforme a norma ABNT NBR 6409 (1997), os pontos da circunferência devem

estar contidos entre esses dois círculos concêntricos no mesmo plano, ou seja, tem relação com os diâmetros encontrados na peça quando medida, como ilustrado na Figura 22.

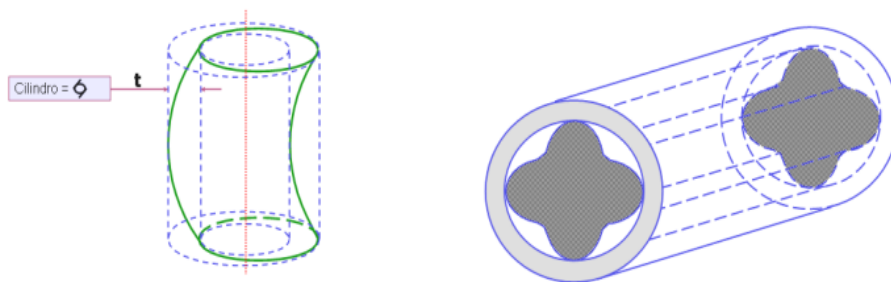
Figura 22 - Tolerância de circularidade



Fonte: KREO Metrology (2022)

b) Cilindricidade: considerada também uma tolerância macrogeométrica, que tem relação com os cilindros coaxiais. A diferença entre os cilindros coaxiais é a cilindridade. O campo de tolerância de cilindridade é limitado por dois cilindros coaxiais, distantes em “t” (ABNT, 1976).

Figura 23 - Representação de cilindridade



Fonte: Adaptado de Taylor (2000)

2.3.8 Rugosidade da superfície usinada

A escolha dos parâmetros R_a (rugosidade média aritmética) e R_z (altura média dos cinco maiores picos e vales) se baseia na ampla aceitação desses índices na caracterização do acabamento superficial em processos de usinagem. Segundo Czitrom et al. (2015), na prática industrial o R_a é um dos parâmetros mais utilizados devido à sua simplicidade de medição e boa correlação com o comportamento funcional de superfícies usinadas. No entanto, ele não capta adequadamente

imperfeições pontuais. Por isso, o Rz é adotado de forma complementar, em aplicações onde a influência de defeitos e irregularidades específicas é crítica, oferecendo maior sensibilidade a picos e vales críticos, especialmente importantes em materiais com alta dureza e propensos à formação de rebarbas, como o ASTM A572.

Esses parâmetros são definidos pela norma ABNT NBR ISO 4287:2002 que estabelece os critérios para medição e interpretação da rugosidade superficial, como Ra e Rz, amplamente utilizados na indústria para o controle de qualidade de superfícies usinadas. Embora os valores exatos dependam das condições de corte, tipo de broca e presença de fluido refrigerante, estudos recentes indicam que, para aplicações estruturais como pontes e componentes metálicos onde o acabamento superficial influencia a integridade mecânica, mas não exige superfícies ultra polidas, recomenda-se um valor de Ra entre 1,6 μm e 3,2 μm e de Rz entre 6,3 μm e 12,5 μm .

Além disso, a rugosidade superficial na furação pode ser reduzida com brocas de alto desempenho, uso adequado de fluido refrigerante e controle de vibrações, embora isso exija maior custo e controle do processo (RICHCONN, 2024).

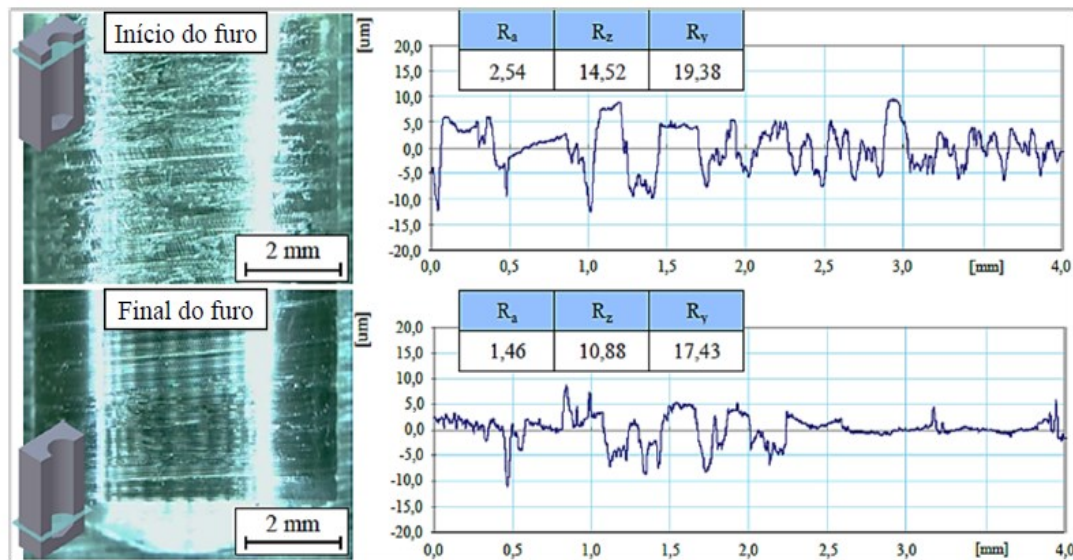
A rugosidade da superfície resultante do processo de furação é formada por irregularidades finas (erros microgeométricos), que são influenciadas pelo avanço e rotação da ferramenta, evacuação do cavaco, uso de APC, e desgaste da broca (Bordin, 2013; Machado et al., 2015).

Diversos estudos têm investigado a rugosidade das superfícies resultantes do processo de furação, considerando diferentes variáveis de entrada. No trabalho de Bez et al. (2022), ao comparar duas geometrias de brocas de metal duro na furação de aço AISI H13 temperado, observou-se que a broca com geometria otimizada apresentou valores médios de Ra inferiores a 1,5 μm , enquanto a geometria convencional resultou em Ra superiores a 2,0 μm . Além disso, o erro de circularidade foi menor com a ferramenta otimizada, indicando melhor estabilidade do processo. Já Moraes et al. (2023), ao investigar a furação a seco de polímeros, verificaram que brocas de metal duro proporcionaram Ra médios de 1,8 μm em termoplásticos, enquanto brocas de aço rápido resultaram em valores acima de 2,5 μm . O parâmetro Rz também apresentou variações significativas, com valores entre 8 μm e 15 μm , dependendo do tipo de polímero e da ferramenta utilizada.

Por fim, Bordin (2013) observou que o perfil de rugosidade e a textura da superfície do furo frequentemente exibem numerosas irregularidades, ilustrado de forma adaptada na Figura 24. Uma característica proeminente é a presença de

material aderido, especialmente no início do furo, resultando em uma maior quantidade de picos e vales no perfil de rugosidade.

Figura 24 - Textura e perfis de rugosidade após a furação do aço ABNT P20



Fonte: Adaptado de bordin (2013), perfis de rugosidade após a furação do aço ABNT P20

Como reforça Denkena & Biermann (2014), a análise combinada desses dois parâmetros permite uma compreensão mais robusta dos efeitos da usinagem sobre a integridade superficial.

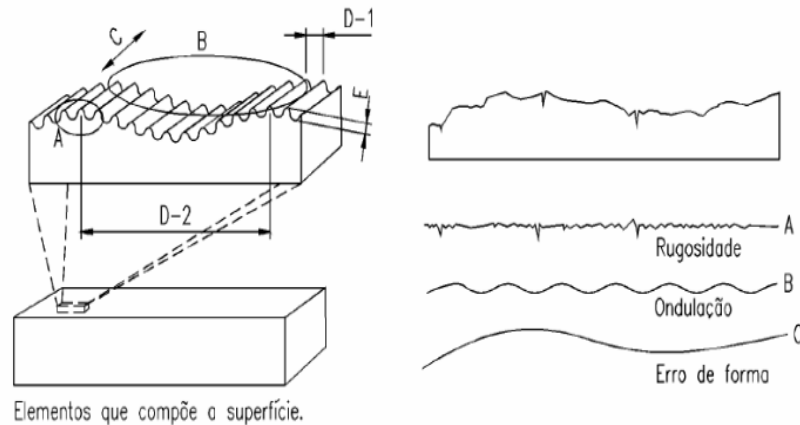
2.3.9 Planicidade da superfície usinada

O perfil superficial é um parâmetro importante para a avaliação da qualidade de superfícies usinadas, assim como a rugosidade. Com o aumento das exigências de precisão na indústria mecânica, sua análise tornou-se essencial para avaliar o desempenho e as propriedades mecânicas das peças fabricadas. Além disso, a crescente demanda por segurança e confiabilidade reforça a importância da caracterização adequada desse parâmetro (MACHADO et al., 2015).

Estudos apontam que irregularidades na superfície inicial podem causar desalinhamentos durante a furação, resultando em desvios dimensionais, aumento do desgaste da ferramenta e comprometimento da precisão do acabamento (Montgomery, 2020). Pesquisas realizadas na Escola Politécnica da USP destacam que a planicidade influencia diretamente a formação de rebarbas e a precisão dimensional em materiais como aço e alumínio (Bordinassi et al., 2003).

A Figura 25 mostra o perfil efetivo de uma superfície e salienta os elementos que compõem a textura superficial de uma peça, decompondo o perfil.

Figura 25 - Perfil efetivo de uma superfície



Fonte: Adaptado de Agostinho (1977)

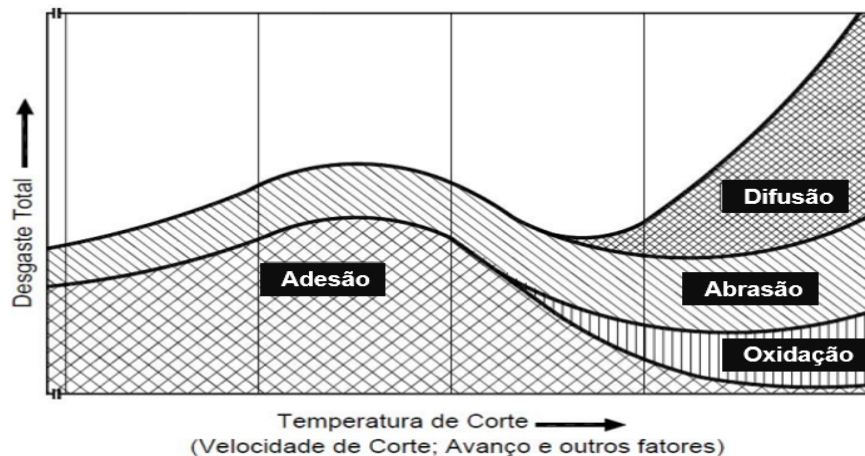
O controle rigoroso da planicidade antes da usinagem e a utilização de técnicas avançadas de medição e preparação das superfícies pode minimizar os impactos negativos e garantir maior precisão e repetibilidade nos resultados, especialmente em processos que envolvem materiais de alta dureza.

2.3.10 Mecanismos de desgaste

As ferramentas de corte são projetadas para operar dentro de certas condições específicas, garantindo uma vida útil determinada. Para identificar o fim dessa vida útil ou buscar maneiras de prolongá-la, é essencial compreender os mecanismos de desgaste que ocorrem durante o processo de corte. O desgaste refere-se à perda contínua de partículas de material da ferramenta em escala microscópica nas superfícies de saída e folga. Já a avaria é definida como a destruição súbita e inesperada da ferramenta de corte.

Conforme Figura 26, os mecanismos de desgaste são evidenciados, mostrando a importância da distribuição desses mecanismos em função da temperatura de corte e de outros parâmetros que a influenciam, como a velocidade de corte e o avanço.

Figura 26 - Mecanismos de desgaste



Fonte: adaptado de Klocke (2010)

Abrasão: ocorre devido ao atrito, que é a principal causa de desgastes, especialmente o desgaste de flanco. Durante o processo de corte, a temperatura elevada pode reduzir a dureza da ferramenta, tornando-a mais suscetível à ação de partículas duras presentes no material que está sendo usinado. Isso facilita o desgaste abrasivo, já que essas partículas duras entram em contato com a ferramenta e causam microcortes ou ranhuras em sua superfície. Com o tempo, esse processo contínuo pode levar a um desgaste significativo da ferramenta, comprometendo sua eficiência e vida útil (Smith & Brown, 2015).

Adesão: O desgaste por adesão ocorre nas interfaces ferramenta-cavaco e ferramenta-peça usinada. Em condições de baixa velocidade de corte e temperatura, pode ocorrer a formação de um extrato intermetálico, levando à aderência entre os materiais. Essa adesão pode formar a aresta postiça de corte (APC), que cresce até se romper, causando microlascamentos na ferramenta e prejudicando o acabamento da superfície usinada. Na furação, a ausência de revestimento na broca pode aumentar a formação de APC, agravando o problema (Jones & Garcia, 2017).

Difusão: processo termoquímico onde os elementos químicos da ferramenta e do material usinado difundem-se entre si. Esse mecanismo é particularmente relevante em altas temperaturas, onde átomos da ferramenta migram para o material usinado e vice-versa. Na furação, temperaturas elevadas podem acelerar esse processo, levando à degradação da ferramenta (Chen, 2018).

Oxidação: ocorre devido à reação da ferramenta com o oxigênio presente no ambiente, formando óxidos na superfície da ferramenta. Esse mecanismo de desgaste

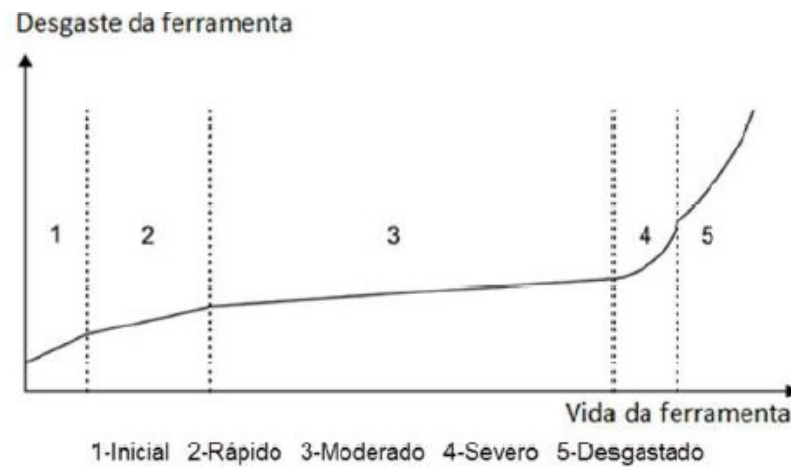
é favorecido por altas temperaturas. Durante a furação, as altas temperaturas podem promover a formação de óxidos que, embora inicialmente possam proteger a ferramenta, eventualmente se desprendem, expondo a superfície da ferramenta a um desgaste acelerado (Lee & Kim, 2016).

2.3.11 Desgastes em brocas

Estudos recentes têm investigado os mecanismos de desgaste de ferramentas durante o processo de furação, destacando que o desgaste de flanco, o lascamento da aresta de corte e o desgaste abrasivo estão entre os mecanismos predominantes em brocas de metal duro e ferramentas indexáveis (Dzulfikri; Huang, 2024). Além disso, o aumento das forças de corte e da temperatura durante o processo de usinagem contribui significativamente para a progressão do desgaste da ferramenta (Khan et al., 2023). Pesquisas também indicam que a geometria da aresta e o tipo de ferramenta utilizada influenciam diretamente a vida útil da ferramenta e a qualidade superficial dos furos produzidos (Ehsan et al., 2025).

O desgaste de ferramentas de corte segue um comportamento característico dividido em três estágios principais. Inicialmente, ocorre um desgaste acelerado devido à interação inicial da ferramenta com o ambiente tribológico, fase na qual o sistema se ajusta às condições do processo. Em seguida, há um período de desgaste uniforme, no qual a taxa de degradação é relativamente estável. Por fim, observa-se uma fase de desgaste acelerado, marcada por um rápido aumento das tensões e temperaturas, levando ao colapso da ferramenta em um curto intervalo de tempo (Machado et al., 2009). No caso de brocas helicoidais, o processo de desgaste é geralmente gradual, mas falhas críticas, como a fratura da aresta principal de corte, tendem a ocorrer de maneira súbita e imprevisível, impactando diretamente a continuidade e eficiência do processo de usinagem (Ertunc et al., 2001). Na Figura 27 ilustra a evolução de desgaste.

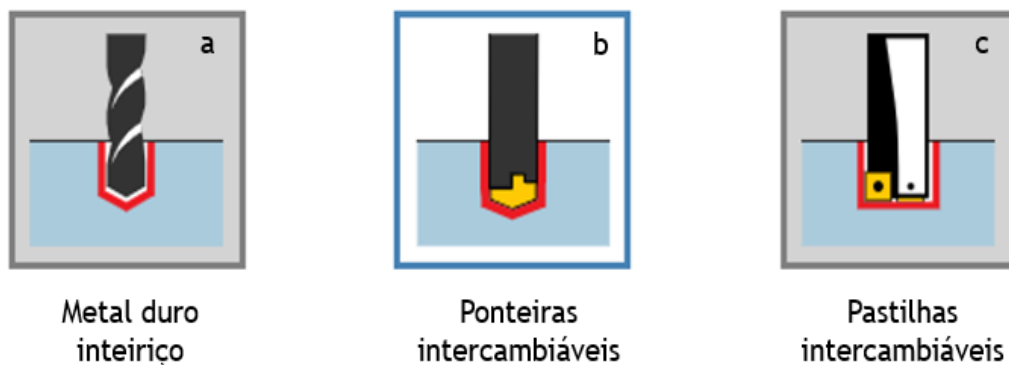
Figura 27 - Evolução de desgaste: (1) Desgaste inicial; (2) Desgaste regular; (3) Desgaste moderado por microlascamentos; (4) Desgaste severo e (5) Colapso



Autor: Ertunc et al. (2001)

A Figura 28 representa diferentes tipos de brocas, como brocas helicoidais inteiriças (a), brocas helicoidais com ponteiros intercambiáveis (b), brocas helicoidais com pastilhas intercambiáveis (c).

Figura 28 - Tipos de brocas



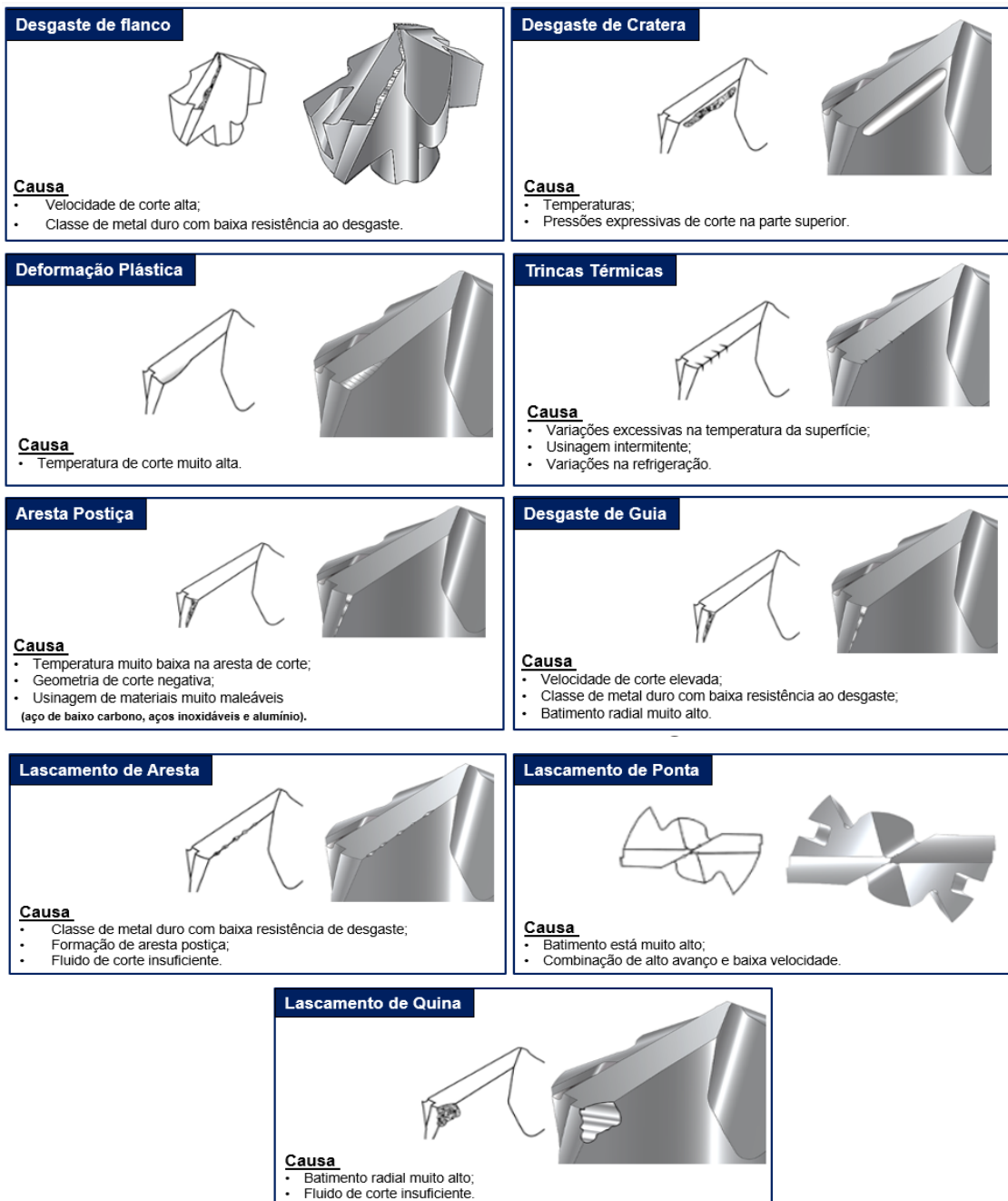
Fonte: Adaptado Iscar (2024)

O presente estudo é aplicado em brocas helicoidais com ponteiros intercambiáveis, logo o desgaste observado nesse modelo é um aspecto crítico que exerce influência direta sobre a vida útil da ferramenta e a qualidade do furo produzido. A teoria do desgaste considera uma série de fatores, como abrasão, adesão, difusão e oxidação, os quais desempenham papéis significativos na determinação da durabilidade da ponteira. Para investigar os mecanismos de desgaste e desenvolver materiais e revestimentos mais resistentes, são empregados estudos experimentais e análises de microscopia eletrônica (LEE; WANG, 2018).

Segundo DINIZ et al. (2008), as arestas de corte de uma ferramenta sofrem um desgaste natural quando é sujeito ao processo de furação. É impossível de ser evitado esse desgaste, entretanto na maioria das vezes pode ser controlado.

Os modos de desgastes presentes em brocas helicoidais com ponteiros intercambiáveis podem ser classificados do seguinte modo, juntamente com as causas responsáveis pelo desgaste conforme demonstrado na Figura 29.

Figura 29 - Modos de desgaste em brocas helicoidais com ponteiros intercambiáveis

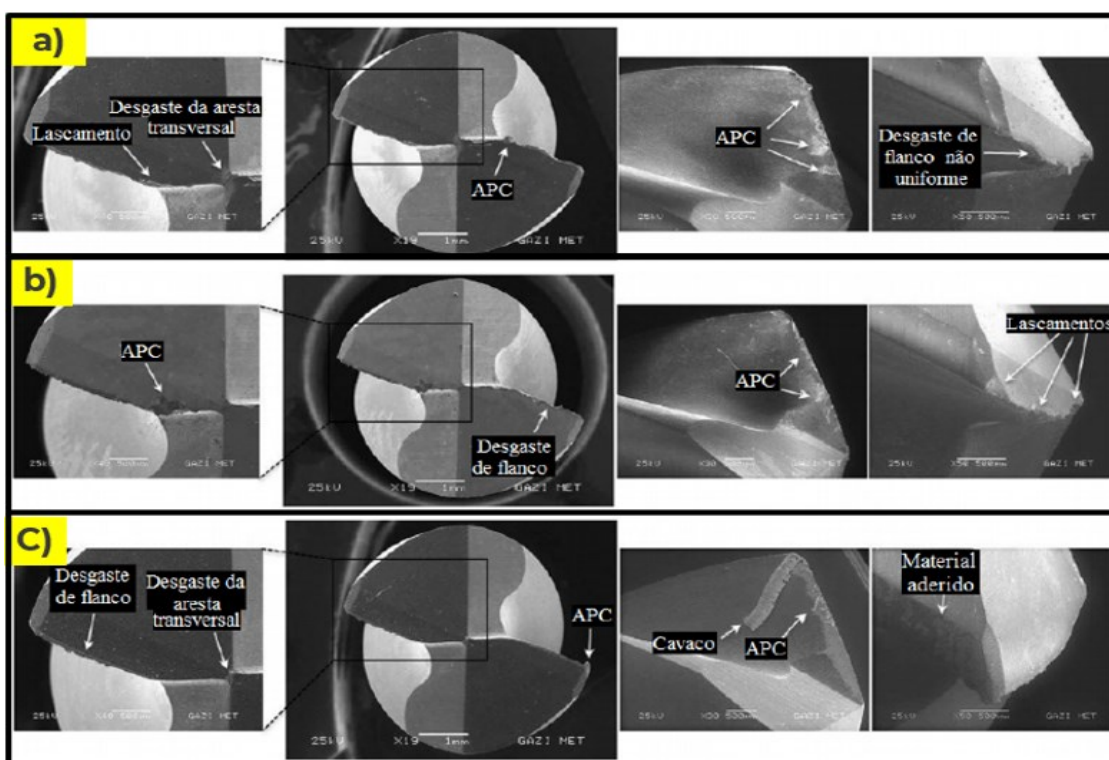


Fonte: Adaptado site Iscar (2024)

No estudo conduzido por Uçak e Çiçek (2018), foram investigadas as condições de corte durante o processo de furação do Inconel 718, com ênfase na identificação dos principais tipos de avarias e mecanismos de desgaste das ferramentas de metal duro utilizadas em brocas, além da influência das condições de lubrificação. Na usinagem a seco (Figura 30a) as altas forças de avanço e temperatura causaram desgaste na aresta transversal, lascamento e desgaste de flanco não uniforme, além de APC e material aderido na superfície de saída da ferramenta.

Na condição criogênica (nitrogênio líquido, Figura 30b), o lascamento foi predominante devido às altas forças de corte e ao maior encruamento do material. A broca utilizada sob a condição abundante (Figura 30c) apresentou o melhor desempenho, com menor atrito e adesão de material devido à ação lubrificante.

Figura 30 – Condições de desgaste: (a) a seco, (b) criogênica e (c) abundante

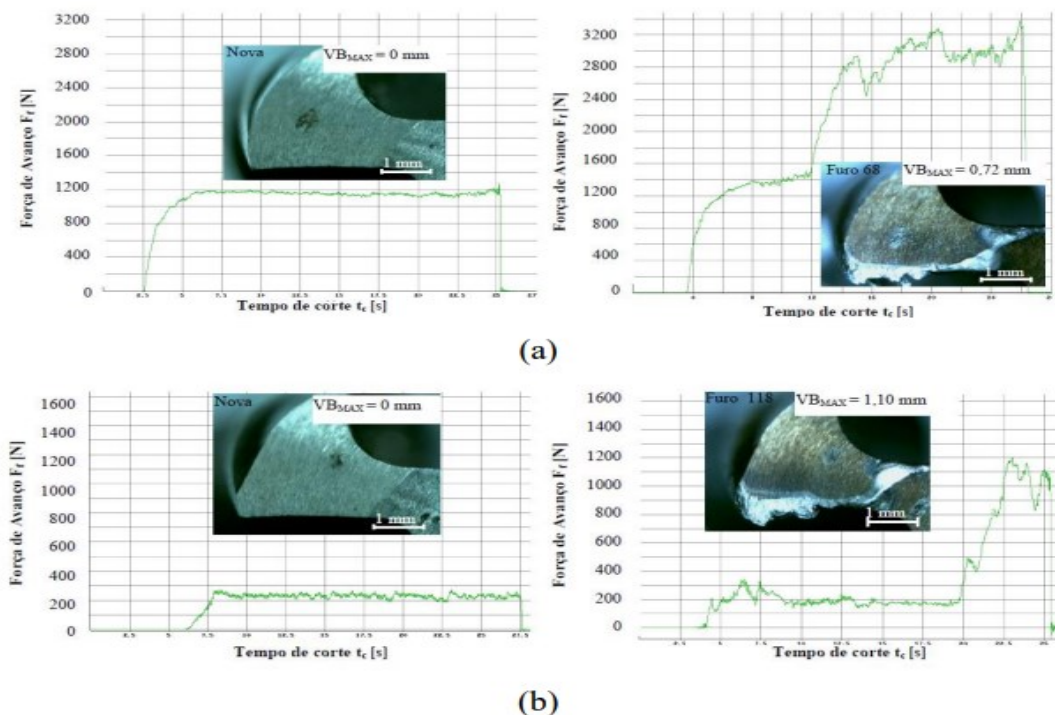


Fonte: Adaptado de Uçak e Çiçek (2018)

No estudo realizado por Bordin (2008), foi verificada a relação entre o desgaste e a força de avanço na determinação do fim da vida útil de uma broca helicoidal de aço rápido não revestidas, com diâmetro de 6 mm e $L/D = 2$, na condição de usinagem a seco, durante a usinagem do aço AISI P20 endurecido sem pré-furo e

com pré-furo. Constatou-se que o mecanismo de desgaste abrasivo levou a um desgaste acelerado, tanto nas arestas principais quanto na aresta transversal da ferramenta. Esse desgaste resultou na elevação da força de avanço à medida que a ferramenta se aproximava do fim de sua vida útil, conforme demonstra a Figura 31.

Figura 31 - (a) Comportamento da força de avanço sem pré-furo; (b) Comportamento da força de avanço com pré-furo



Fonte: Adaptado Bordim (2008)

2.3.12 Vida útil das ferramentas

A norma ISO 8688-2 estabelece critérios específicos para determinar o fim de vida de ferramentas de corte (brocas e fresas), como aço rápido, metal duro e cerâmica, em operações de desbaste. Esses critérios incluem limites para parâmetros técnicos que influenciam diretamente o desempenho da ferramenta, como desgaste de flanco, rugosidade da superfície usinada e eficiência do corte, garantindo que a substituição ou reafiação da ferramenta ocorra dentro de padrões que preservem a qualidade e a produtividade do processo (ISO, 1999).

- Desgaste médio de flanco (VB_B): limite de 0,3 mm, indicando o critério padrão de desgaste aceitável.

- Desgaste máximo de flanco ($VB_{\text{máx}}$): valor máximo permitido de 0,6 mm, definindo a condição para troca ou reafiação.
- Profundidade de cratera (KT): determinada pela equação $KT=0,06+0.3f_c$, em que f_c representa o avanço por rotação (mm/rev).
- Desgaste de entalhe (VB_N): limite fixado em 1 mm.
- Falha catastrófica: condição extrema que invalida o uso da ferramenta devido à perda total de funcionalidade.

A durabilidade ou vida útil de uma ferramenta está diretamente relacionada à velocidade de corte empregada, parâmetro que influencia significativamente o aquecimento na zona de formação do cavaco. O aumento da temperatura nessa região intensifica os mecanismos de desgaste da ferramenta, acelerando a degradação de suas propriedades de desempenho (Machado et al., 2009). Estudos mais recentes também indicam que o aumento da velocidade de corte e das condições térmicas na interface ferramenta-peça favorece a progressão do desgaste e reduz a vida útil da ferramenta, especialmente em operações de furação, nas quais o calor gerado é elevado devido à dificuldade de dissipação térmica no interior do furo (Ehsan et al., 2025).

Bez et al. (2022) analisou o desempenho de brocas de metal duro com diferentes geometrias na furação do aço AISI H13 temperado, avaliando desgaste de flanco, rugosidade superficial e erro de circularidade. Utilizando o critério de fim de vida da ferramenta com base em 0,3 mm de desgaste, conforme princípios da norma ISO 8688-2, os resultados indicaram que a geometria da ponteira influencia significativamente tanto na durabilidade da ferramenta quanto na qualidade do furo, evidenciando a importância da seleção adequada da ferramenta para aplicações em materiais de alta dureza.

2.4 Meios lubrificantes

Na indústria de usinagem, a competitividade exige processos que sejam ao mesmo tempo econômicos e de alta qualidade. Os avanços tecnológicos, como novos materiais para ferramentas, sistemas de controle numérico computadorizado (CNC), e o uso de técnicas de lubrificação e refrigeração eficientes, são fundamentais para atingir esses objetivos. Esses avanços permitem que a indústria produza peças

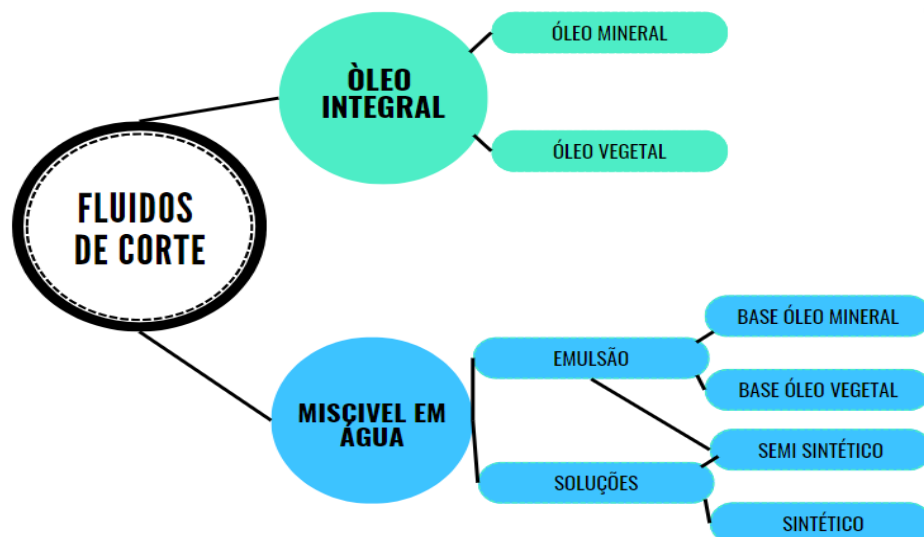
complexas e de alta precisão de forma mais rápida e com menor custo, atendendo às exigências do mercado global.

Segundo Debnath e colaboradores (2014), o desenvolvimento de técnicas de usinagem avançadas, bem como a utilização de fluidos de corte ambientalmente amigáveis, são estratégias importantes para atender a essas necessidades.

Os meios lubrificarrefrigerantes são essenciais no processo de usinagem, especialmente na furação, não apenas fornecem refrigeração e lubrificação, mas também desempenham um papel vital na remoção dos cavacos formados. Esta função adicional ajuda a prevenir a obstrução do furo, mantém a precisão dimensional e reduz o desgaste da ferramenta, garantindo um processo de furação mais eficiente e de alta qualidade [Diniz et al., 2013].

A Figura 32 é visto a classificação dos fluidos de corte sendo dois tipos principais: miscíveis em água e não miscíveis em água. Os miscíveis incluem emulsões e soluções químicas, conhecidas por suas propriedades refrigerantes e lubrificarrefrigerantes. Os óleos integrais, sejam minerais ou vegetais, são preferidos para operações de desbaste pesado devido à sua excelente capacidade de lubrificação [Diniz et al., 2013].

Figura 32 - Classificação dos fluidos de corte



Fonte: Adapto de Diniz (2001)

Na furação, o fluido de corte deve ter alta lubrificação e baixa viscosidade para facilitar a remoção dos cavacos. A boa lubrificação reduz o atrito e o desgaste da ferramenta, enquanto a baixa viscosidade ajuda na evacuação eficiente dos cavacos do furo [Diniz et al., 2013]. Considerando que a peça e a ferramenta estão sempre em

contato dificultando o acesso do fluido, pode ser utilizado sempre que possível, broca com canais com refrigeração internos.

Segundo Tschätsch (2009), observa-se uma evolução significativa nas técnicas emergentes e nas práticas de aplicação de fluidos de corte, incluindo a busca por alternativas que atendam às exigências ambientais e de saúde ocupacional, bem como estratégias voltadas à otimização do uso desses fluidos no processo de usinagem. O autor destaca também a relação entre a forma de aplicação e a quantidade utilizada, evidenciando que em sistemas convencionais de usinagem abundante podem ser empregadas taxas superiores a 600 litros por hora (l/h). Em contraposição, a técnica de Quantidade Mínima de Lubrificação (Minimum Quantity Lubrication – MQL) utiliza volumes substancialmente inferiores, variando entre 0,05 l/h e 1,0 l/h.

2.5 Propriedades do aço ASTM A572 GR50

Devido a ampla diversidade de aços, surgiram mecanismos para sua classificação, sujeitos a revisões periódicas. A classificação dos aços pode ocorrer como base na composição, nos processos de acabamento ou na forma do produto (CHIAVERINI, 1988).

O aço ASTM A572 GR 50 é uma categoria de aço estrutural que segue as diretrizes da norma ASTM (Sociedade Americana de Teste e Materiais), foi escolhido por sua representatividade industrial e pelas exigências técnicas que impõe às ferramentas de corte. Trata-se de um aço de alta resistência e baixa liga, amplamente utilizado para aplicações em setores como construção civil, viadutos, indústria pesada e aplicações estruturais. Segundo Li et al. (2020), esses aços apresentam propriedades mecânicas elevadas aliadas à boa soldabilidade, sendo, portanto, ideais para a investigação do desempenho de brocas com ponteiros intercambiáveis, especialmente quanto ao desgaste da ferramenta e qualidade da superfície usinada. Seus elementos de ligas essenciais cujos quais incluem nióbio, vanádio, titânio, nitrogênio, ou uma combinação destes (ASTM A 572/ 572 M1). Esses componentes conferem ao aço as propriedades mecânicas necessárias para atender os requisitos de elevados níveis de propriedades mecânicas, mantendo-se a boa tenacidade e soldabilidade específicos de sua aplicação.

Além disso, estudos como os de Poulachon et al. (2016) indicam que ligas HSLA são especialmente desafiadoras em operações de furação, demandando

ferramentas otimizadas em termos de geometria e revestimento, o que corrobora a relevância da escolha para a pesquisa.

É estabelecido pela norma diferentes categorias para classificação do aço como base em seu uso, nomeadamente graus 42 [290], 50 [345] e 55 [380], destinados à construção rebitadas, soldadas ou aparafusadas e os graus 60 [415] e 65 [450] utilizado para construções de pontes (ASTM INTERNATIONAL, 2015). Na Tabela 2 é evidenciado os diferentes graus de classificação.

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas do Aço ASTM A572

Grau do Aço	Limite de Escoamento (MPa)	Resistencia à Tração (MPa)	Alongamento Mínimo (% em 200mm)
42	290	415	20
50	345	450	18
55	380	485	17
60	415	520	16
65	450	550	15

Fonte: ASTM A 572/ 572 M-21, (2021)

Na Tabela 3 está detalhada a composição química dos diferentes graus de classificação estabelecidos pela norma ASTM A-572 para o aço. Essa norma especifica os limites de concentração de elementos como carbono, manganês, fósforo e enxofre, bem como outros elementos adicionais que influenciam diretamente as propriedades mecânicas e a aplicabilidade do material em diversas indústrias.

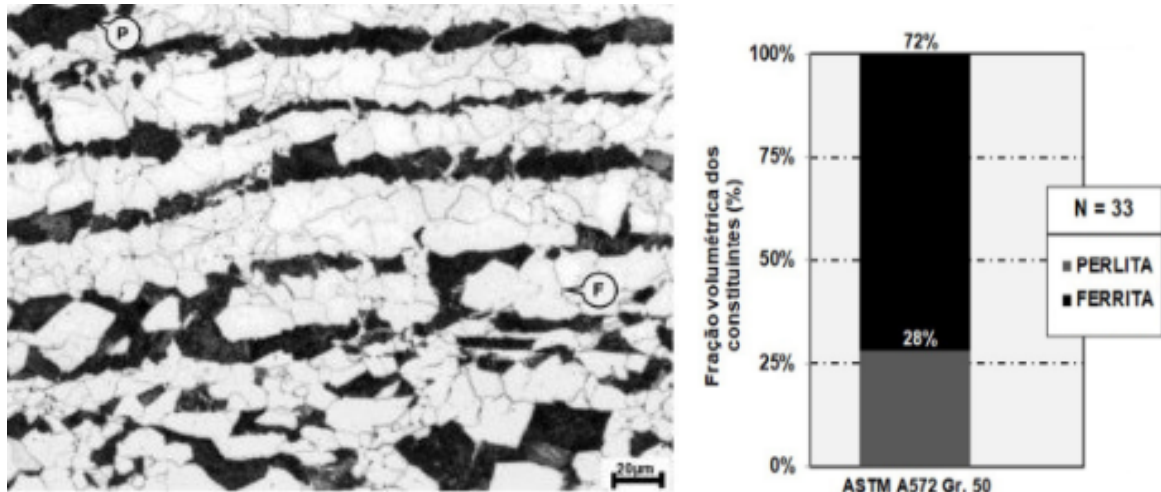
Tabela 3 - Faixa de composição química para os diferentes graus do aço ASTM A-572

Aço	%C	%Mn	%P	%S	%Si
ASTM A-572 GR 42 [290]	0.21 máx.	1.35 máx.	0.04 máx.	0.05 máx.	0.4 máx.
ASTM A-572 GR 50 [345]	0.23 máx.	1.35 máx.	0.04 máx.	0.05 máx	0.4 máx.
ASTM A-572 GR 55 [380]	0.25 máx.	1.35 máx.	0.04 máx.	0.05 máx	0.4 máx.
ASTM A-572 GR 60 [415]	0.26 máx.	1.35 máx.	0.04 máx.	0.05 máx	0.4 máx.
ASTM A-572 GR 65 [450]	0.23 máx.	1.65 máx.	0.04 máx.	0.05 máx	0.4 máx.
ASTM A-572 GR 65 [450]	0.26 máx.	1.35 máx.	0.04 máx.	0.05 máx	0.4 máx.

Fonte: ASTM A 572/ 572 M1

Na Figura 33 é visto que a microestrutura de aços estruturais é matriz mista de ferrita e perlita (BORBA et al., 2017).

Figura 33 - Microestrutura e fração volumétrica perlita e ferrita do aço ASTM A572 GR 50



Fonte: Adaptado de Borba et al. (2017)

2.6 Usinabilidade

O termo "usinabilidade" abrange todas as propriedades de um material que influenciam o processo de usinagem (König et al., 1997). A usinabilidade é afetada por diversas propriedades mecânicas, incluindo dureza, resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e a taxa de encruamento do material (Diniz et al., 2013; König et al., 1997).

Uma grande vantagem da utilização dos aços microligados é por apresentarem melhores propriedades mecânicas como elevada resistência, ductilidade e boa soldabilidade, elevando a relação do limite de escoamento para o limite de resistência à tração, além de pequenas adições de elementos de liga atuarem como um facilitador para usinabilidade destes aços (ZHANG et al., 2008; LIU et al., 2014).

O aço ASTM A572 GR50 material em estudo, é um aço estrutural de alta resistência e baixa liga, amplamente utilizado em aplicações de construção e engenharia devido à sua combinação de alta resistência e boa tenacidade. Quando se trata de usinabilidade, o ASTM A572 GR50 apresenta algumas características específicas que devem ser consideradas para otimizar o processo de usinagem:

- a) Ferramentas de corte: recomenda-se o uso de ferramentas de metal duro (carbeto) ou de aço rápido (HSS) revestido para a maior durabilidade, já relacionado a geometria da ferramenta, o ângulo de folga e incidência são ideais para minimizar a força de corte e o desgaste da ferramenta (Machining Data Handbook, 1980; Oberg et al., 2016).
- b) Parâmetros de corte: relacionado a evitar o superaquecimento e o desgaste excessivo da ferramenta tem-se que a velocidade de corte deve ser moderada. No entanto para se manter a qualidade da superfície e a precisão dimensional, deve-se ajustar o avanço e a profundidade de corte de acordo com a condição da ferramenta e rigidez da máquina (Machining Data Handbook, 1980; Oberg et al., 2016).
- c) Lubrificação e refrigeração: o uso de fluido de cortes é essencial para reduzir o calor gerado durante a usinagem, aumentando a vida útil da ferramenta. Fluidos de corte solúveis em água ou óleos de corte são comumente utilizados (Machining Data Handbook, 1980).
- d) Desgaste da ferramenta: devido sua alta resistência, o aço ASTM A572 Grau 50 pode causar desgaste acelerado nas ferramentas de corte. Monitorar o desgaste e substituir as ferramentas conforme necessário é crucial para manter a eficiência do processo de usinagem (Oberg et al., 2016).
- e) Acabamento superficial: a usinagem deste aço pode resultar em uma superfície de qualidade aceitável, mas o ajuste fino dos parâmetros de corte é necessário para obter um acabamento superficial de alta qualidade (Machining Data Handbook, 1980).

2.7 Análises Estatísticas Anova e Teste tukey

A análise de variância (ANOVA), desenvolvida por R.A. Fisher, é amplamente reconhecida como uma das ferramentas estatísticas mais robustas para a comparação de médias entre grupos experimentais. Introduzida inicialmente no contexto de experimentos agrícolas, a ANOVA foi projetada para avaliar a significância estatística das diferenças entre grupos, considerando a variabilidade dentro e entre eles (Fisher, 1925; Cochran, 1980). Essa técnica é fundamentada na hipótese nula (H_0), que assume a igualdade das médias entre os grupos, e na hipótese alternativa (H_1), que sugere que pelo menos um grupo apresenta uma média distinta. O teste de hipótese é formalizado matematicamente e frequentemente complementado por

métodos de comparações múltiplas, como o teste de Tukey, para identificar quais grupos diferem significativamente.

A aplicação da ANOVA transcende os limites da estatística agrícola, sendo amplamente utilizada em áreas como biologia, psicologia, ciências sociais e engenharia, devido à sua capacidade de lidar com múltiplos fatores e interações (Montgomery, 2020). Além disso, autores como Callegari-Jacques (2003) destacam a importância da ANOVA em estudos experimentais, enfatizando sua eficácia na análise de dados com distribuição normal. O uso de softwares estatísticos, como o Jamovi, SPSS e R, tem facilitado a implementação dessa técnica, permitindo análises mais rápidas e precisas, como apontado por Field et al. (2018).

A relevância da ANOVA no contexto científico é amplamente documentada na literatura. Fisher (1925) introduziu os princípios de randomização e blocos experimentais, que são fundamentais para a validade dos resultados. Cochran (1980) reforça a importância da ANOVA como uma ferramenta indispensável para o delineamento experimental, enquanto Montgomery (2020) explora sua aplicação em projetos industriais e de engenharia. Esses avanços consolidaram a ANOVA como um pilar da análise estatística moderna, promovendo rigor e confiabilidade na interpretação de dados experimentais.

O teste de Tukey, desenvolvido por John W. Tukey, é amplamente utilizado para identificar diferenças estatisticamente significativas entre médias de grupos após uma análise de variância (ANOVA). Essa técnica é baseada na comparação de todas as combinações possíveis de grupos, utilizando a diferença mínima significativa para avaliar relevância estatística (Tukey, 1949). Sua aplicação é eficaz em contextos que envolvem múltiplos grupos experimentais, garantindo confiabilidade nas comparações (Montgomery, 2020). Ferramentas computacionais, como R e SPSS, têm facilitado sua implementação, permitindo análises rápidas e precisas (Field et al., 2018). Além disso, estudos destacam o teste como robusto na identificação de diferenças em amostras com variâncias homogêneas (Callegari-Jacques, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo traz uma descrição dos materiais, ferramentas, equipamentos e métodos utilizados na realização dos experimentos, assim como a sistemática utilizada para sua realização.

3.1 Material usado

O material para a preparação do corpo-de-prova é o aço ASTM A572 GR 50, sendo uma categoria de aço estrutural que segue as diretrizes da norma ASTM (American Society for Testing and Materials), possuindo boa tenacidade e soldabilidade. A microestrutura de aços estruturais é matriz mistas de ferrita e perlita e a composição química do material é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química do material

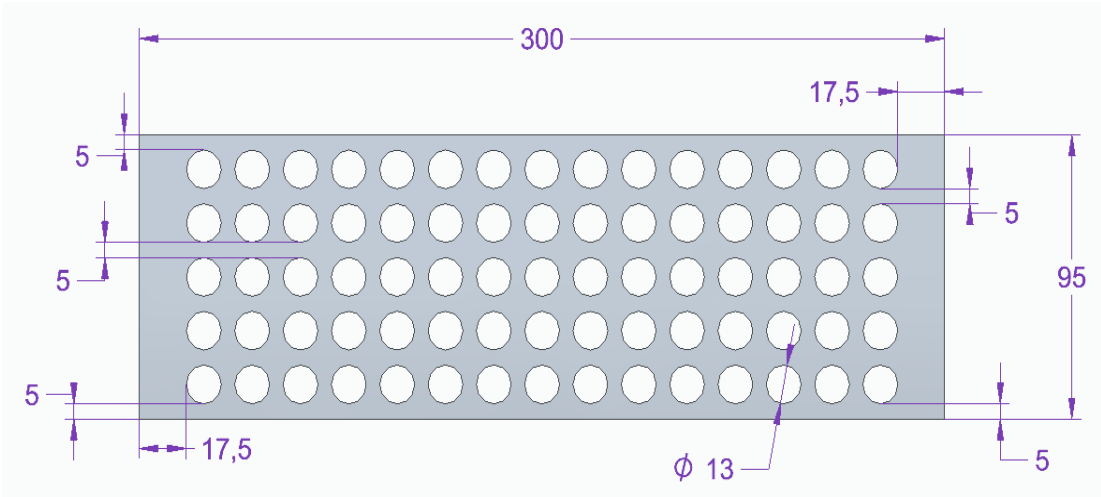
Composição Química					
Elementos	%C	%Mn	%P	%S	%Si
ASTM A-572 GR 50	0.23 máx.	1.35 máx.	0.04 máx.	0,05 máx.	0.4 máx.

Fonte: ASTM A 572/ 572 M1

3.2 Corpo de prova e simulação de usinagem

Os corpos de prova utilizados no presente estudo têm características e dimensionais para facilitar o ajuste, fixação e sua troca no dispositivo. A Figura 34 mostra as dimensões do corpo de prova, sendo o mesmo com 300 mm de comprimento e 95 mm de altura.

Figura 34 - Corpo de Prova



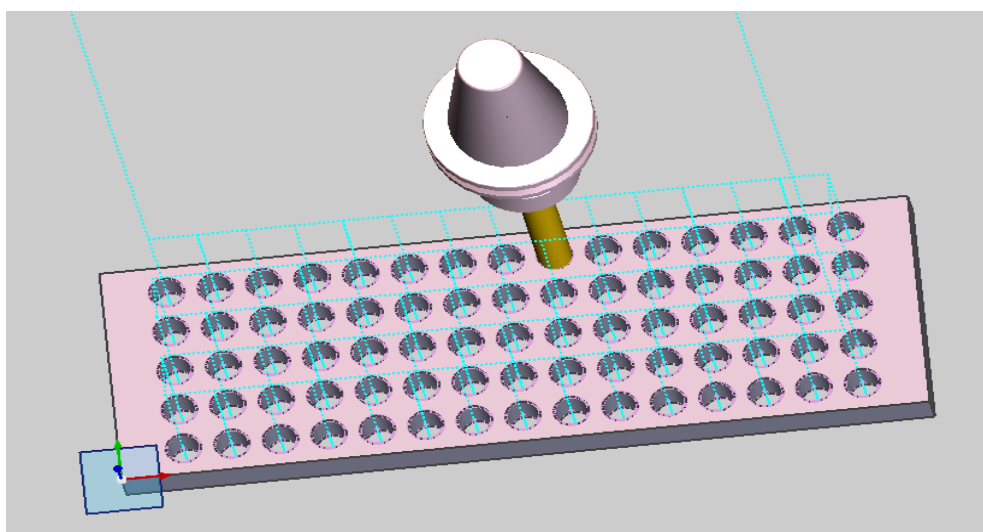
Fonte: Autoria própria (2026)

O desenho dos corpos de prova para execução dos furos foi feito com auxílio do software Solid Edge® e a programação de usinagem foi realizada através do software Edgecam™.

O espaçamento entre as paredes foi mantido em 5 mm, tanto na orientação vertical quanto na horizontal. A distribuição dos furos foi realizada de forma alternada, posicionando 15 furos ao longo do eixo horizontal e 5 furos ao longo do eixo vertical, o que resultou em um arranjo intercalado entre as linhas e colunas. Essa configuração possibilitou a usinagem de um total de 75 furos por ciclo, otimizando o processo.

A simulação do processo de furação foi realizada utilizando o software Edgecam™, onde os furos foram produzidos de maneira alinhada na orientação vertical, conforme demonstrado na Figura 35.

Figura 35 - Simulação de usinagem do corpo de prova

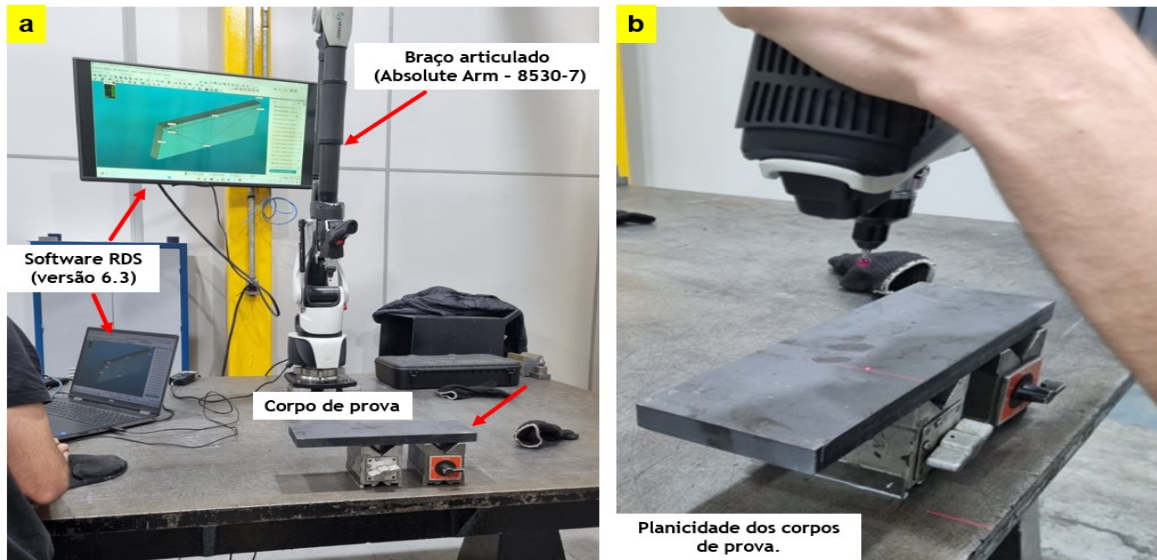


Fonte: Autoria própria (2026)

3.3 Planicidade do corpo de prova

Através do braço de medição portátil (modelo Absolute Arm 7-Axis (8530-7)), fabricante hexagon e do *software* RDS versão 6.3, foi realizada a leitura de planicidade dos corpos de provas para verificar avarias na superfície ou inconsistências relacionadas à planicidade do material a ser usinado (Figura 36).

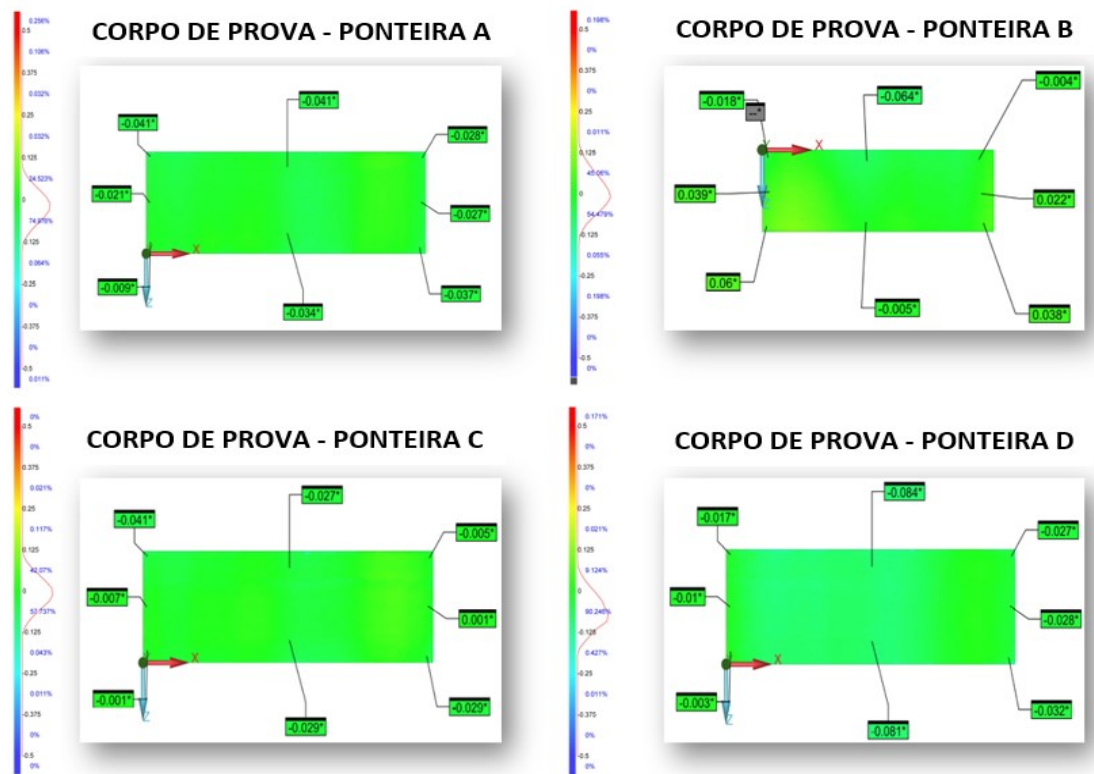
Figura 36 - a) Leitura de planicidade; b) Digitalização; c) Dados



Fonte: Autoria própria (2026)

Após a análise dos dados obtidos em relação à planicidade dos corpos de prova utilizados com cada ponteira, foi constatado conforme Figura 37 que não houve variações significativas entre eles. Essa consistência na planicidade assegura que o desvio dimensional não interferirá nos resultados do processo de usinagem.

Figura 37 - Dados Planicidade

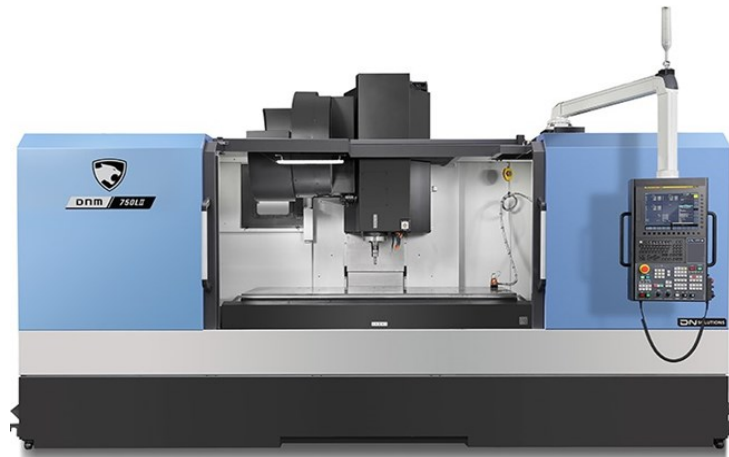


Fonte: Autoria própria (2026)

3.4 Máquina-Ferramenta

As furações foram realizadas em centro de usinagem CNC DOOSAN VERTICAL DNM750LII (Figura 38), com refrigeração interna, fuso com rotação máxima de 12000 rpm e potência de 18,5kW.

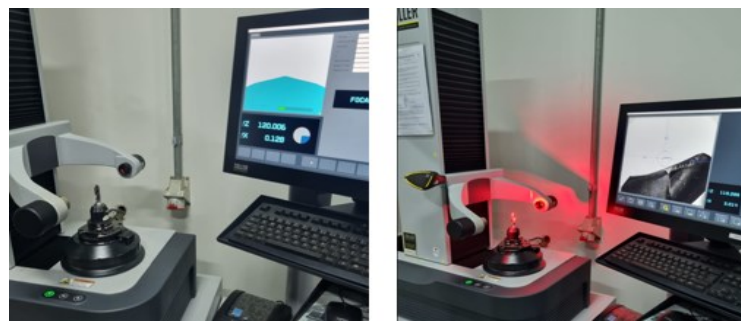
Figura 38 - CNC Doosan Vertical DNM750LII



Fonte: Autoria própria (2025)

Para análise das ferramentas utilizou-se uma máquina de *pre-set* por feixe de luz e projetor de perfil óptico do fabricante ZOLLER, utilizada para verificar medições com precisão de altura, batimento, executar medições nas ferramentas. A Figura 39, apresenta o equipamento.

Figura 39 - Pré Set – Zoller



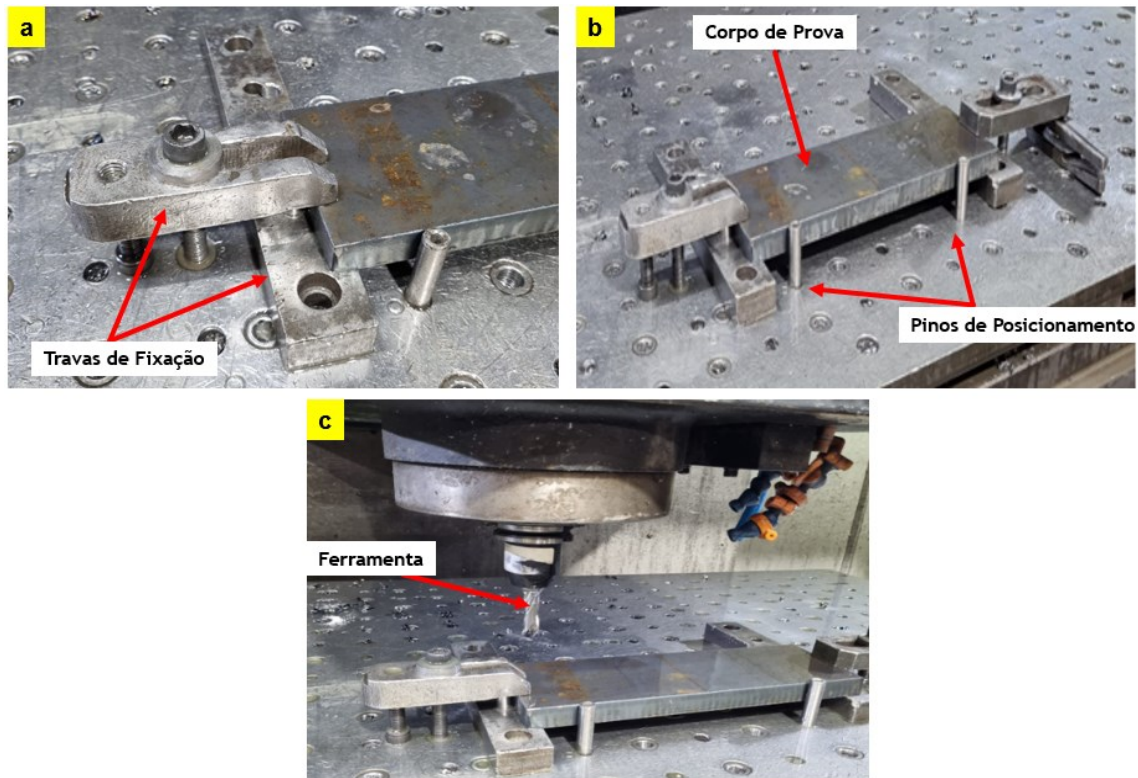
Fonte: Autoria própria (2025)

3.5 Fixação e alinhamento do corpo-de-prova

Primeiramente, antes dos testes, verificou-se o alinhamento da base de fixação, das garras e dos pinos de posicionamento, após foi realizada a fixação do corpo-de-prova de forma precisa e segura (Figura 40), para evitar movimento durante a furação. O alinhamento nos eixos X, Y foi realizado com um relógio apalpador a fim

de garantir ou minimizar as variações para as medições posteriores. Todos os alinhamentos ficaram com menos de 0,01mm de variação.

Figura 40 - Fixação nas extremidades do corpo de prova



Fonte: Autoria própria (2025)

3.6 Meios lubrirrefrigerantes

O meio lubrirrefrigerante convencional utilizado nos testes de furação a jorro foi o tirreno greencool 1200, correspondendo a um fluido sintético solúvel em água (diluição de 5 a 10%) para usinagem em geral de metais. Sua fórmula é isenta de óleo mineral, cloro, dietanolamina (DEA), fenóis, nitritos, metais pesados e outras substâncias nocivas ao meio ambiente e a saúde do trabalhador. A solução apresenta excelente biostabilidade e proteção anticorrosiva.

3.7 Ferramentas de corte

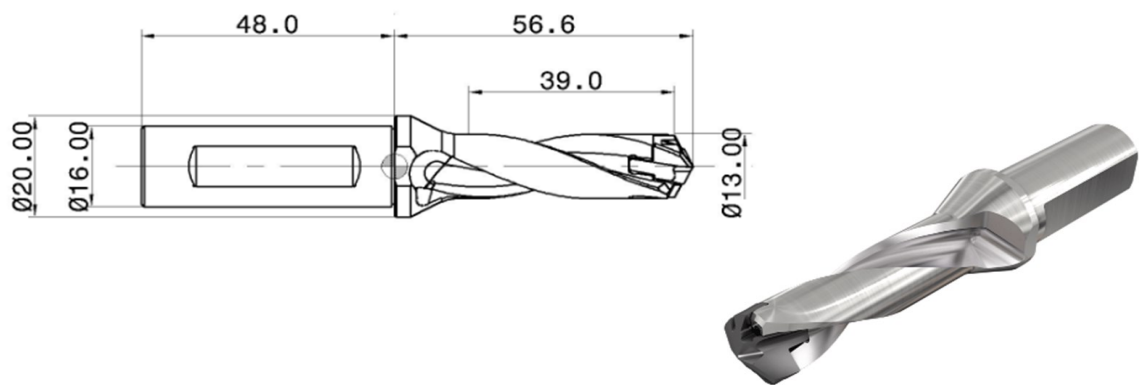
Foram utilizadas brocas helicoidais dotadas de ponteiros intercambiáveis, com diferentes geometrias nas arestas de corte. Apesar das variações na configuração das ponteiros, todas apresentavam o mesmo diâmetro nominal de furo, igual a 13 mm. O objetivo principal foi avaliar a eficiência de cada ferramenta,

considerando as características de corte e a qualidade dos furos obtidos. A análise incluiu a observação do desgaste da ferramenta, a qualidade do acabamento superficial e a integridade do furo produzido, utilizando os mesmos parâmetros de usinagem para todas as ponteiras.

3.7.1 Corpo da broca helicoidal

O corpo da broca helicoidal, onde são fixadas as ponteiras, utilizado no presente estudo é de aço rápido base SAE 4340 modificado, com estrutura refinada, tendo uma dureza superficial de 40-48 HRC. Esse modelo DCN 130-039-16A-3D SUMOCHAM 3xD possui haste plana e furos internos de líquido de arrefecimento.

Figura 41 – Broca helicoidal - Modelo DCN 130-039-16A-3D



Fonte: Fabricante Iscar

3.7.2 Classe das Ponteiras

As ponteiras são pertencentes ao fabricante Iscar, da classe IC908, ou seja, substrato resistente, metal duro com estrutura micro-grãos refinados de revestimento PVD de TiAlN espessura 6,1 μm . Esses modelos de ponteiras são recomendadas para a furação de diferentes classes de materiais pertencentes ao grupo ISO P, como aços de baixo e médio teor de carbono, aços ligados e aços estruturais de alta resistência. Esses materiais incluem, por exemplo, aços carbono de baixa liga, aços estruturais do tipo HSLA, bem como ligas utilizadas em aplicações mecânicas e estruturais. As ferramentas são projetadas para operar em uma ampla faixa de velocidades de corte, apresentando elevada resistência ao desgaste e bom desempenho em diferentes condições de usinagem.

Os quatro modelos de ponteiros intercambiáveis têm formatos diferentes que interferem no modo de realizar a furação na usinagem. Embora todas tenham um diâmetro padrão de furo de 13 mm, suas geometrias e ângulos variam. As diferenças nas características de cada modelo estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise das ponteiros

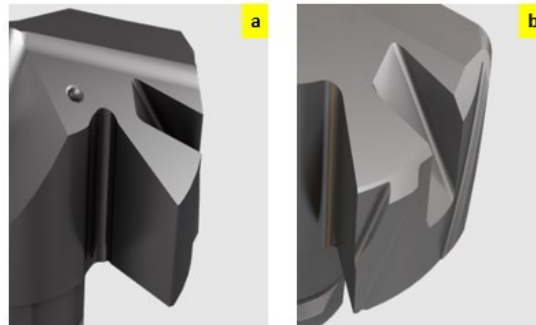
GEOMETRIA DAS PONTEIRAS								Abreviações	
Ponteira	DC	PL	LF	SIG	2M	RV	CRV	DC	Diâmetro de corte
A	13.0	1.960	5.64	140	-	PVD	TIAIN	PL	Comprimento do ponto
B	13.0	1.960	5.64	140	SIM	PVD	TIAIN	LF	Comprimento funcional
C	13.0	3.510	4.09	-	-	PVD	TIAIN	SIG	Ângulo de ponta
D	13.0	2.710	5.64	136	SIM	PVD	TIAIN	2M	Dupla Margem
								RV	Revestimento
								CRV	Camada de revestimento

Fonte: Autoria própria (2026)

Neste estudo foram utilizadas ponteiros intercambiáveis com dois tipos de geometrias laterais: margem única e margem dupla. A geometria de margem única, apresenta uma única superfície de apoio lateral, que contribui para a estabilização da broca durante a furação, reduzindo o acúmulo de calor e as forças de corte (Sandvik Coromant, 2023). Essa configuração é recomendada para aplicações em alta velocidade e em materiais que exigem dissipação térmica eficiente, como alumínio e ligas leves (Wolf Brasil, 2024). Além disso, a menor área de contato lateral pode favorecer o desempenho em furos rasos e de menor diâmetro.

Por sua vez, a margem dupla é uma característica geométrica presente em brocas e ponteiros intercambiáveis que consiste em duas superfícies de apoio lateral ao longo do corpo da ferramenta. Essas margens têm como função principal guiar a ferramenta durante o corte, reduzir vibrações e melhorar a estabilidade dimensional do furo. Ferramentas com dupla margem são mais comuns em ponteiros intercambiáveis ou especiais, onde o projeto permite incorporar superfícies opostas para maior controle de trajetória e desgaste uniforme (Stoeterau, 2007). A Figura 42 apresenta modelos de ponteiros de simples e dupla margem.

Figura 42 - a) Ponteira de simples margem; b) Ponteira de dupla margem



Fonte: Fabricante Iscar (2025)

3.7.3 Ponteira Modelo A

O modelo A corresponde a ponteira ICP 130 que é uma ponteira de furação intercambiável desenvolvida para aplicações gerais em alta velocidade. Possui aresta de corte afiada e refrigeração interna, proporcionando boa evacuação de cavacos e elevada produtividade em operações CNC. O revestimento contribui para melhor resistência ao desgaste abrasivo da ferramenta e maior estabilidade térmica durante a usinagem, favorecendo a integridade da aresta de corte em elevadas temperaturas. Sua geometria convencional com margem simples pode reduzir a estabilidade dimensional em comparação com geometrias de dupla margem, devido ao menor efeito de guia durante a furação. Além disso, o ângulo de ponta de 140° favorece a penetração em materiais de média resistência, contribuindo para maior eficiência no corte (ISCAR, 2026).

Figura 43 – Ponteira modelo A

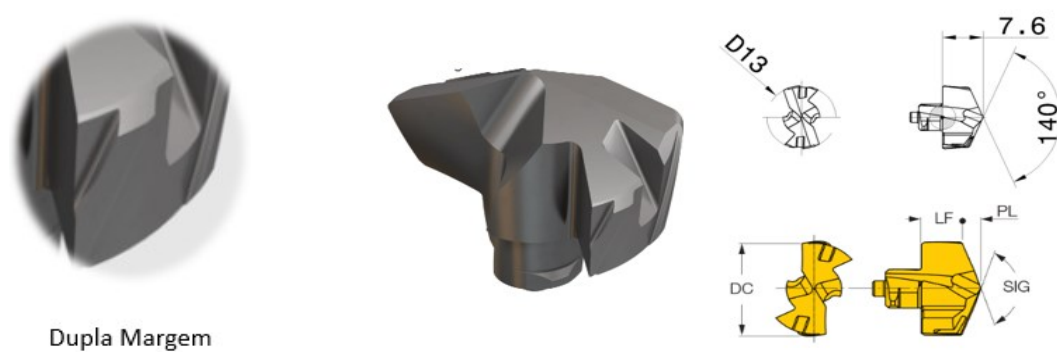


Fonte: Site Iscar (2026)

3.7.4 Ponteira Modelo B

A ponteira modelo B correspondente a ICP 130-2M que possui geometria com dupla margem de guia, desenvolvida para melhorar a cilindricidade, retilidade e acabamento superficial dos furos. Essa configuração proporciona maior estabilidade durante a usinagem e redução da dispersão dimensional, permitindo acabamento superficial de até 1,6 Ra e elevada precisão geométrica (ISCAR, 2026).

Figura 44 – Ponteira modelo B



Fonte: Site Iscar (2026)

3.7.5 Ponteira Modelo C

A ponteira HCP 130-IQ referenciada como modelo C, da fabricante ISCAR apresenta geometria auto-centrante com arestas de corte côncavas, proporcionando maior estabilidade durante a furação e redução de desvios na entrada da ferramenta. Essa característica contribui para melhor precisão dimensional, menor dispersão dos resultados e melhoria da circularidade dos furos (ISCAR, 2026).

Figura 45 – Ponteira modelo C

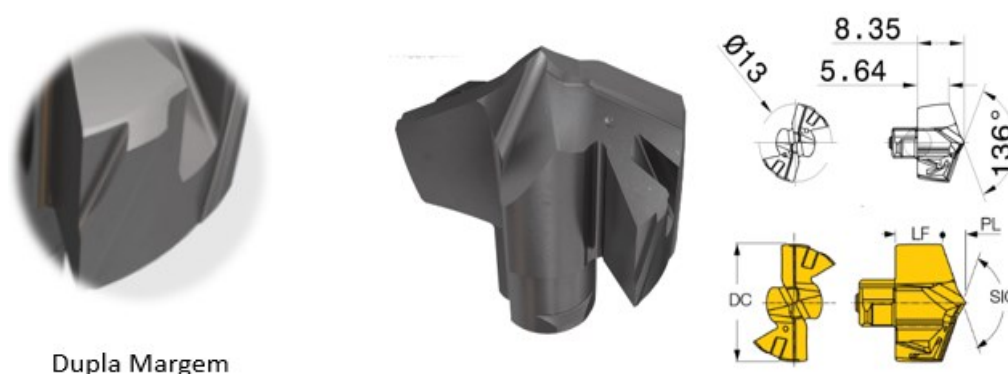


Fonte: Site Iscar (2026)

3.7.6 Ponteira Modelo D

A ponteira modelo D é equivalente a QCP 130-2M da ISCAR, apresenta capacidade de auto-centragem aprimorada e boa estabilidade durante a furação. Sua geometria foi desenvolvida para proporcionar melhor retilidade, melhor circularidade e acabamento superficial superior dos furos, reduzindo desvios durante a entrada da ferramenta no material. Essas características contribuem para maior precisão dimensional e estabilidade do processo de usinagem (ISCAR, 2026).

Figura 46 – Ponteira modelo D

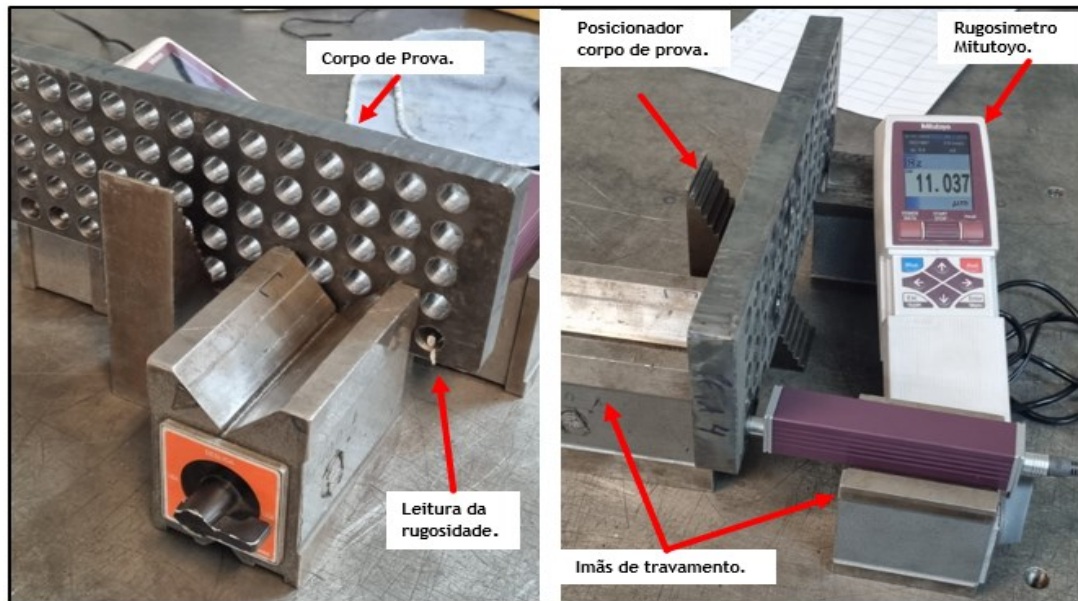


Fonte: Site Iscar (2026)

3.8 Equipamentos para medição de rugosidade 2D e 3D

Para a análise da topografia da parede dos furos foi utilizado um rugosímetro 2D portátil digital Mitutoyo, modelo Surftest SJ-210 (178-561-12A). As medições foram realizadas em todos os corpos de prova. A fixação das amostras foi garantida por um sistema de travamento magnético, aplicado em ambos os lados do corpo de prova, assegurando a estabilidade durante o processo. Além disso, foi utilizado um posicionador para centralizar a ponta de medição, posicionando-a precisamente no centro do comprimento do furo, garantindo assim maior precisão nos resultados obtidos (Figura 47).

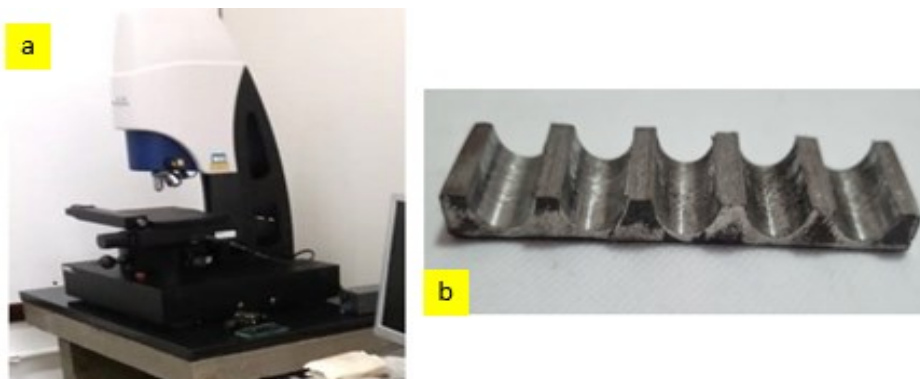
Figura 47 - Medição da Rugosidade dos furos



Fonte: Autoria própria (2026)

Para a condição de medição tridimensional (3D) utilizando o interferômetro de luz branca Taylor Hobson, modelo Talysurf CCI Lite M12-3993-03, foram executados cortes nos corpos de prova, permitindo a avaliação das alterações superficiais geradas. As análises foram conduzidas nos corpos de prova para cada modelo de ponteira testado.

Figura 48 - Interferômetro de luz branca (a), corpo de prova avaliado (b)



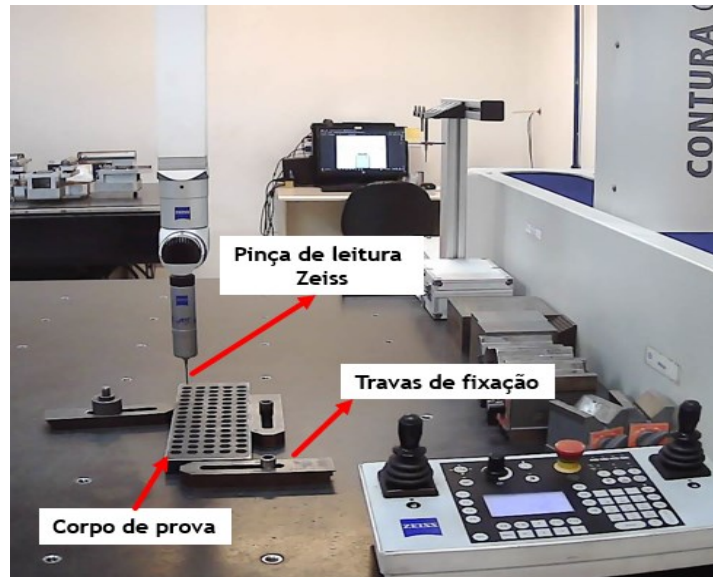
Fonte: Autoria própria (2026)

3.9 Equipamento para avaliação do diâmetro e circularidade

Para a realização da medição dos diâmetros e das circularidades foi desenvolvido um programa para a máquina tridimensional CNC do fabricante Carl Zeiss modelo Contura G2 RDS (cabeçote VAST®) conforme Figura 49, específico

para avaliação das características do corpo-de-prova definidos neste trabalho tal como, diâmetro, circularidade e posição.

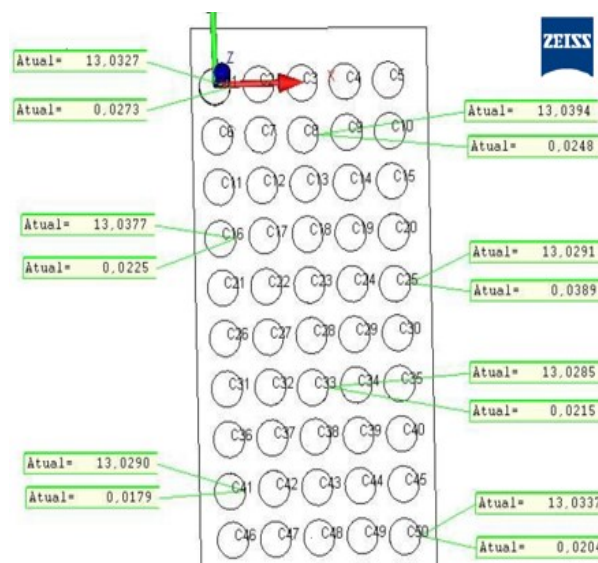
Figura 49 - Máquina MMC Zeiss - Modelo Contura G2 RDS



Fonte: Autoria própria (2026)

A aquisição dos dados foi realizada por meio de leitura automatizada utilizando a máquina de medição por coordenadas (CMM) Zeiss, resultando na geração de um arquivo contendo as coordenadas espaciais dos pontos medidos no corpo de prova, essenciais para a avaliação metrológica e controle dimensional da peça.

Figura 50 – Leitura dos dados de furação avaliados pela máquina Zeiss



Fonte: Autoria própria (2026)

3.10 Equipamento para análise do desgaste da ferramenta

Os ensaios de caracterização do desgaste e análise de alterações superficiais produzidas na ferramenta foram realizados utilizando o microscópio eletrônico de varredura (Zeiss, modelo EVO MA 15) e o equipamento de microanálise química EDS X-Max de 20mm² do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Estes equipamentos foram empregados devido a capacidade de fornecer imagens de alta resolução e análise detalhada da topografia e da composição superficial das ferramentas, permitindo uma avaliação precisa dos padrões de desgaste e conclusões pós-experimentais.

3.11 Parâmetros de usinagem

Conforme especificação do fabricante da ferramenta de metal duro, para a categoria do material a ser usinado e com base nas características de percentual de carbono, diâmetro de furação, foram selecionados os parâmetros de corte a fim de obter resultados mais confiáveis conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de usinagem

Velocidade de Corte (Vc)	Avanço (f)
85 m/min	0,25 mm/rot

Fonte: Autoria própria (2026)

3.12 Análises estatísticas

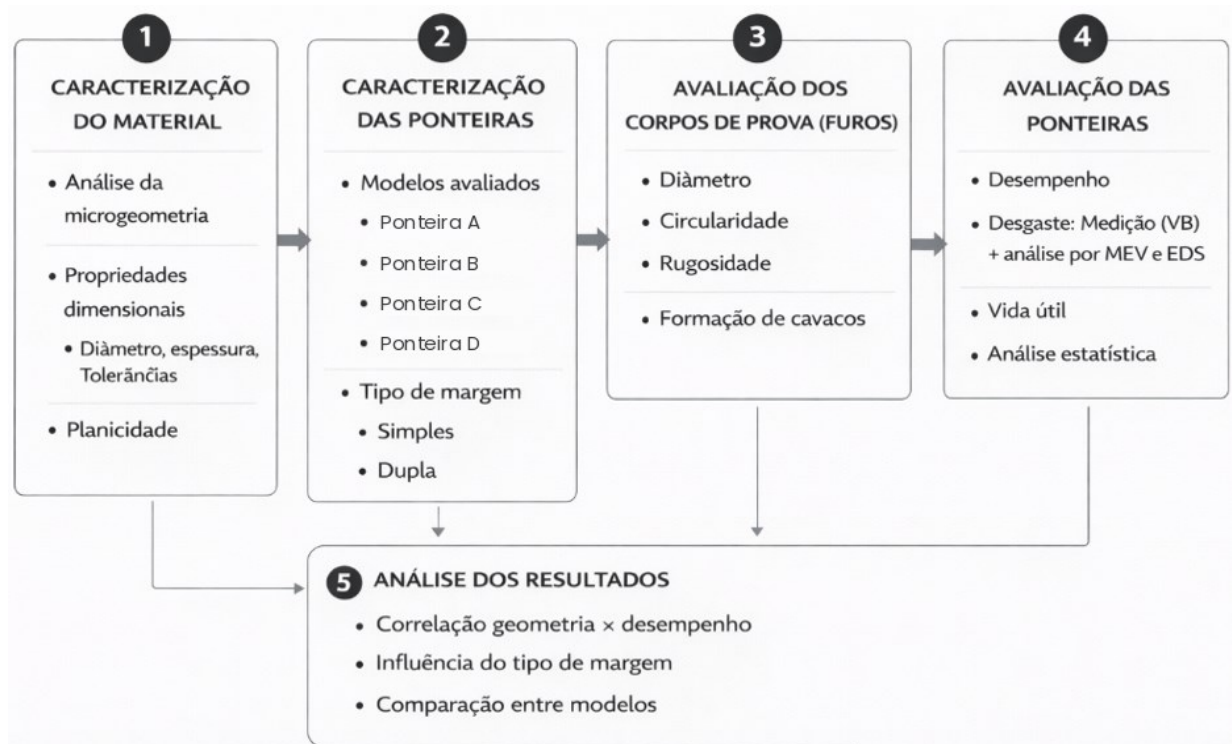
A análise dos resultados obtidos foi conduzida por meio de uma análise estatística de variância (ANOVA) de fator único, com o propósito de identificar os principais desvios em relação às médias das medições. Foram avaliados os ensaios de rugosidade, diâmetro, circularidade e desgaste VB, e calculadas as médias dos valores medidos para cada ponteira aplicada nos processos de usinagem.

Posteriormente, o teste de comparações múltiplas de Tukey foi empregado para identificar os grupos com desvios estatisticamente significativos, permitindo uma avaliação mais aprofundada e precisa dos dados.

3.13 Etapas

A metodologia usada foi baseada em desenvolvimento experimental de ensaios. O fluxograma das atividades abordadas nesse trabalho, associados ao corpo-de-prova, ferramentas e processos é apresentado na Figura 51. Inicialmente, foram definidos os parâmetros de usinagem e as condições experimentais a serem adotadas. Em seguida, realizaram-se os ensaios de furação, com coleta sistemática dos dados relacionados ao desempenho das ferramentas. Posteriormente, os resultados obtidos foram organizados e analisados, permitindo a avaliação do comportamento das diferentes geometrias de ponteiras ao longo do processo.

Figura 51 - Fluxograma de Atividades



Fonte: Autoria própria (2026)

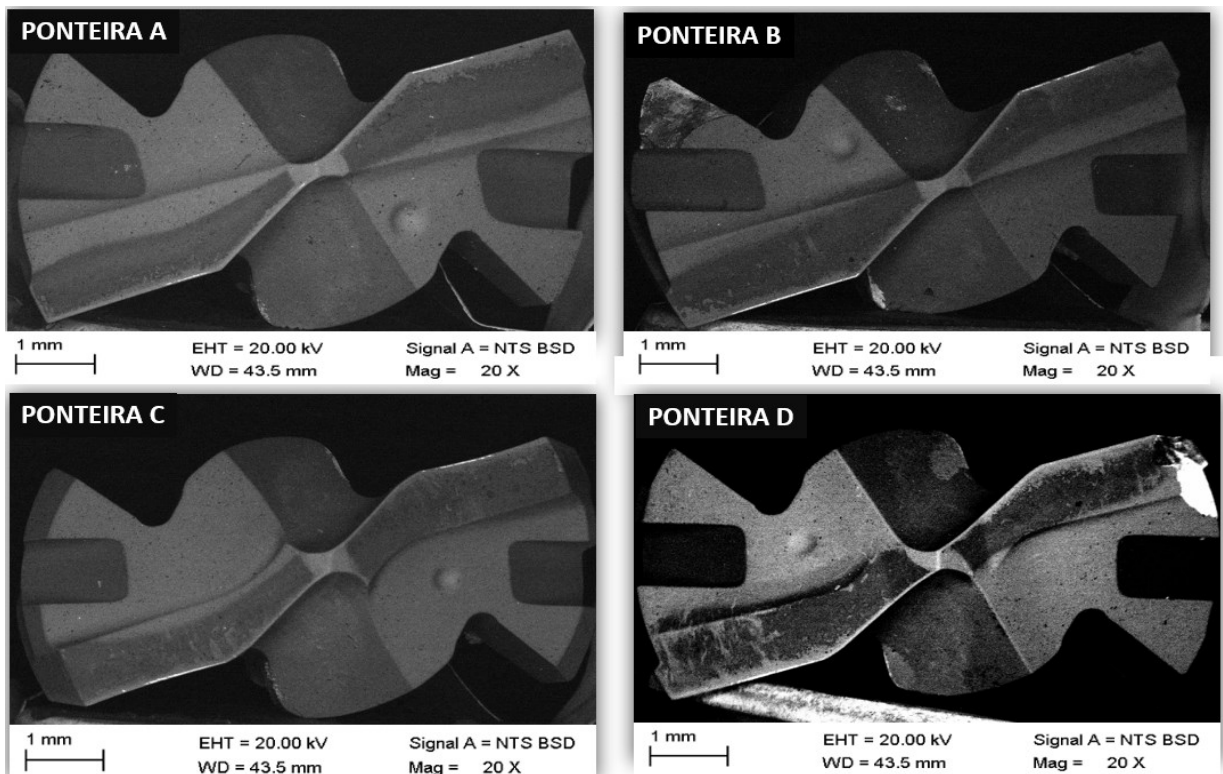
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o emprego de quatro ponteiros intercambiáveis, responsáveis por 450 furos em corpos de prova. A análise contempla os seguintes parâmetros: desgaste, rugosidade, diâmetro, circularidade e morfologia dos cavacos. Esses dados permitem avaliar o desempenho dimensional, superficial e funcional de cada modelo de ponteira ao longo do processo de usinagem.

4.1 Análise de desgaste das ponteiros

O objetivo principal deste tópico é analisar as diferenças relativas no desgaste gerados nas ponteiros. Na Figura 52 observa-se que as ponteiros de dupla margem (B e D) apresentaram sinais recorrentes de desgaste, principalmente na forma de lascamento nas quinas.

Figura 52 – Condições das ponteiros após processo de furação



Fonte: Autoria própria (2026)

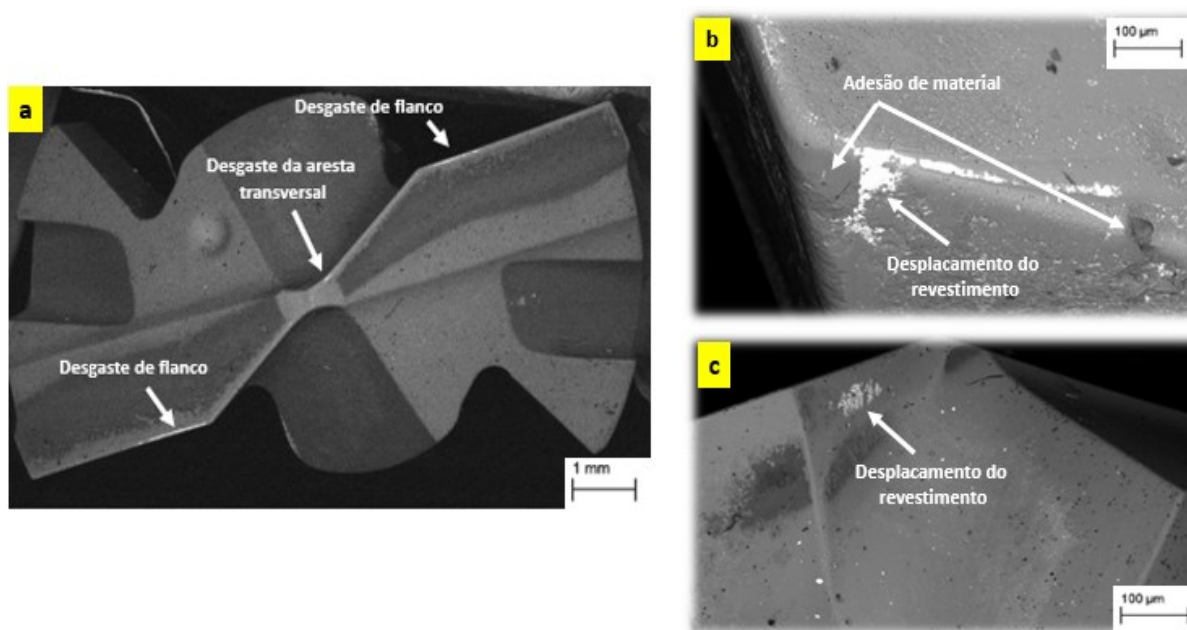
Esses danos foram mais frequentes em comparação às ponteiros de margem simples, sugerindo menor resistência mecânica sob as condições aplicadas. O

lascamento indica perda progressiva de material por impacto ou atrito concentrado, enquanto as rupturas localizadas apontam para falhas estruturais mais críticas. A análise visual e os registros fotográficos reforçam essa tendência, evidenciando a vulnerabilidade das ponteiros de dupla margem. Esses resultados contribuem para a compreensão do comportamento mecânico dos diferentes modelos em estudo.

4.1.1 Desgaste ponteira A

A análise da ponteira A revelou um desgaste de flanco mínimo, assim como na aresta transversal e guia. Através da avaliação da microgeometria da ponteira realizado pelo MEV é possível verificar as regiões de desgaste, assim como a presença de material aderido na ponteira, como pode ser visto na Figura 53.

Figura 53 – Desgaste ponteira A a), desgaste região da guia (b) e aresta transversal (c)



Fonte: Autoria própria (2026)

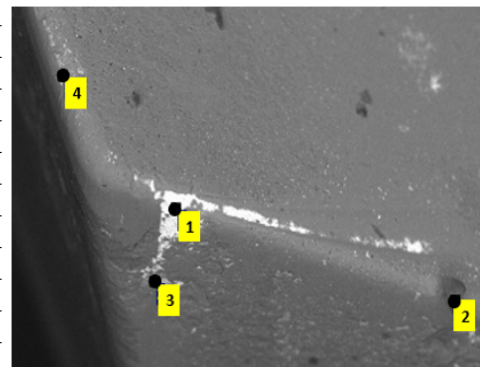
Com base na análise química dos pontos de desgastes, observa-se na Figura 54 uma variação significativa na composição dos elementos ao longo das regiões afetadas pelo processo de furação. Na região do ponto 1 o tungstênio (W) é predominante, indicando desgaste do revestimento e exposição do substrato do metal-duro. Entretanto no ponto 3 a elevada concentração de ferro (Fe) sugere adesão do material da peça sobre a ferramenta.

Os pontos 2 e 4 evidenciam oxidação progressiva nas áreas mais desgastadas, podendo comprometer a resistência da superfície e acelerar o modo de falha. Vestígios de cromo (Cr) e manganês (Mn) sugerem uma interação química entre o substrato e os resíduos de material da peça usinada.

Os outros elementos químicos com concentrações menores na região de desgastes adicionais na tabela incluem o silício (Si) e enxofre (S). A presença do silício (Si) se deve ao resíduo do material usinado. O enxofre (S) indica ligações químicas oriundas do fluido de corte.

Figura 54 - Resultado da análise EDS dos pontos selecionados (Ponteira A)

	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4
Nitrogênio (N)	17,62		4,68	
Oxigênio (O)		35,00		38,79
Alumínio (Al)	5,31	14,87	2,09	6,72
Titânio (Ti)	11,21	43,83	1,73	12,48
Cromo (Cr)	0,67			
Ferro (Fe)		3,11	83,43	32,79
Cobalto (Co)	0,84			
Mangânes (Mn)			1,31	2,41
Tungstênio (W)	59,10		0,58	
		0,34 (Si)		
		0,52 (S)		
Outros		0,47(Cl)	0,18(Si)	0,30(Si)



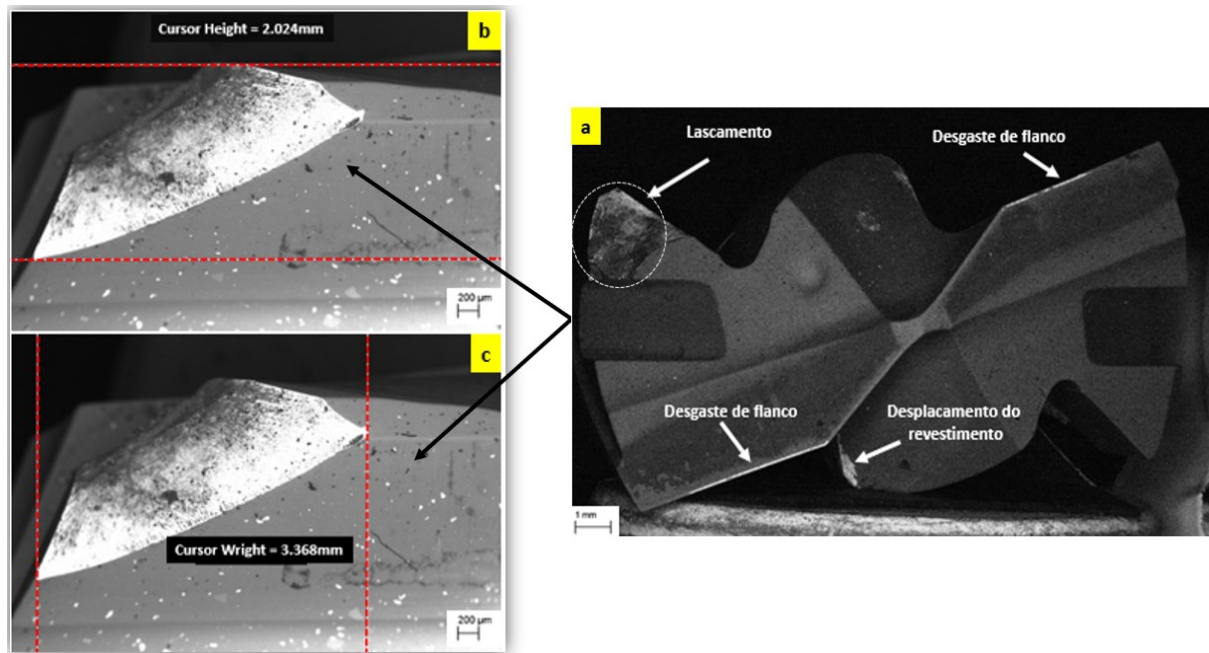
Fonte: Autoria própria (2026)

A ponteira A apresentou desgaste leve e localizado, com comportamento tribológico estável. As análises por MEV e EDS evidenciaram mecanismos adesivos e oxidativos, além da exposição pontual do substrato. O desgaste não comprometeu a integridade geométrica da ferramenta, indicando desempenho adequado nas condições avaliadas.

4.1.2 Desgaste ponteira B

A ponteira B apresentou sinais evidentes de lascamento concentrados principalmente na área da guia, tendo também deslocamento do revestimento e desgaste de flanco. As imagens obtidas permitiram identificar o padrão e a distribuição dos danos, oferecendo uma caracterização detalhada das áreas mais suscetíveis ao lascamento e desgaste da superfície e as modificações geométricas resultantes.

Figura 55 - Desgaste da ponteira B



Fonte: Autoria própria (2026)

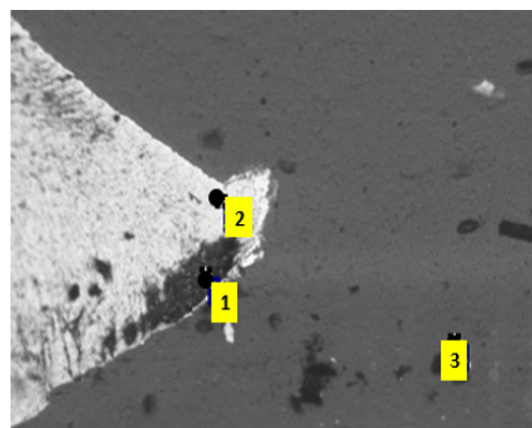
A Figura 56 evidencia as variações químicas após usinagem, sendo que o elevado teor de cobalto (Co) e tungstênio (W) nos pontos 2 e 3 indica ausência do revestimento nessas regiões. Logo promove uma intensificação dos mecanismos de desgaste, uma vez que a material base passa a ser diretamente exposto às solicitações mecânicas e as condições ambientais agressivas, comprometendo sua integridade superficial e acelerando sua degradação (OLIVEIRA et al., 2010).

No ponto 1 identifica-se uma adesão de material na superfície da ferramenta, atribuído diretamente ao processo de furação do aço ASTM A572 GR50. Além disso, foram detectados diversos elementos químicos na superfície, indicando uma interação complexa entre a ferramenta e o material trabalhado nessa região.

A presença do cobalto (Co) encontrado em diferentes proporções, pode ser um reflexo do desgaste do revestimento. Além disso, elementos como sódio (Na) e cálcio (Ca) aparecem em traços, sugerindo contaminação por fluido de corte ou interação química no processo. O silício (Si), detectado em alta concentração no Ponto 2, pode estar relacionado a resíduos do material usinado ou do ambiente de usinagem. Esses dados indicam que o desgaste ocorreu de maneira diferenciada ao longo da ferramenta, possivelmente influenciado por variações na pressão de corte, temperatura e condições operacionais.

Figura 56 - Resultado da análise EDS dos pontos selecionados (Ponteira B)

	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3
Nitrogênio (N)			4,51
Oxigênio (O)	57,62	7,76	5,61
Alumínio (Al)	1,63		2,00
Titânio (Ti)	0,25		2,44
Cromo (Cr)		0,46	0,54
Ferro (Fe)	3,82		
Cobalto (Co)	0,95	8,90	5,27
Mangânes (Mn)	1,31		
Tungstênio (W)		81,69	66,20
Sódio (Na)	0,93	0,37	
Cálcio (Ca)	2,35	0,33	
	0,97 (K)		
	0,49 (Cl)		
	29,53 (Si)		
Outros	0,15 (S)	0,50 (Cl)	



Fonte: A autoria própria (2026)

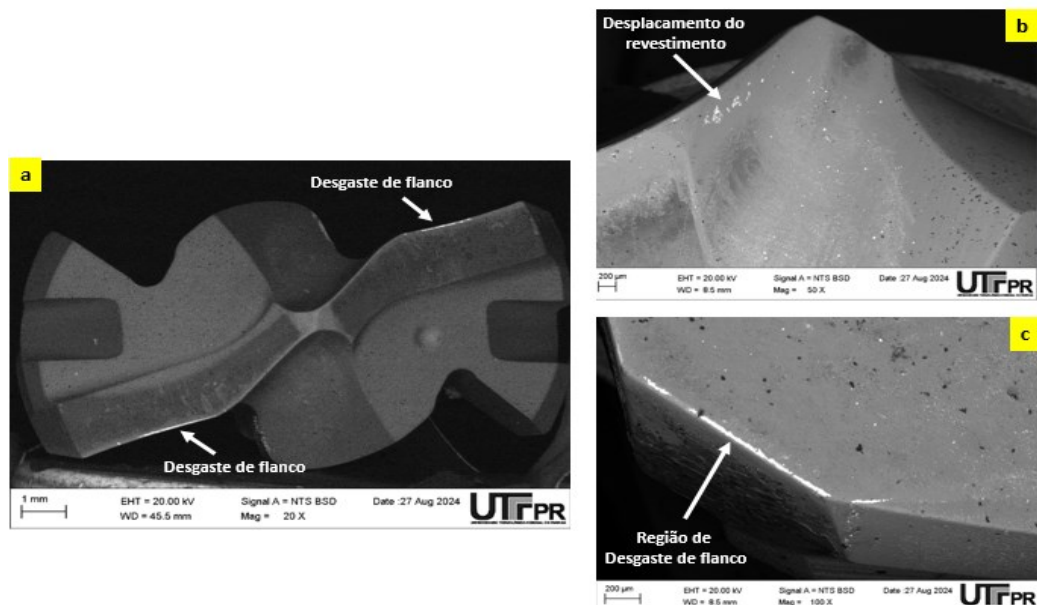
A ponteira B apresentou desgaste mais severo, com ocorrência de lascamento e degradação do revestimento. Esse comportamento indica maior instabilidade da ferramenta sob as condições de usinagem avaliadas.

4.1.3 Desgaste ponteira C

O menor desgaste observado na ponteira C indica que, apesar de seu comprimento funcional reduzido e da ausência de dupla margem, a combinação entre o maior comprimento de ponta e a geometria de corte resultou em uma interação ferramenta-peça menos severa na região de flanco. Esse comportamento pode estar associado à formação de cavacos mais estável e à redução do atrito efetivo entre a superfície de folga e a parede do furo, limitando a progressão dos mecanismos de desgaste por abrasão e adesão.

Além disso, o menor comprimento funcional contribui para uma zona de contato reduzida ao longo da parede do furo, o que diminui a área sujeita ao atrito contínuo durante a usinagem. Como consequência, a ponteira C apresentou um regime de desgaste mais localizado e menos severo, preservando sua integridade estrutural e funcional ao longo do processo de furação quando comparada aos demais modelos.

Figura 57 – a) Regiões de desgaste da ponteira C; b) Zona de deslape do revestimento; c) Região de desgaste analisada



Fonte: Autoria própria (2026)

Conforme a análise dos pontos selecionados para esse modelo de ponteira tem-se que a Figura 58 apresenta os pontos 1 e 2 com elevada concentração de tungstênio (W) indicando exposição do substrato nessas regiões.

No ponto 3, constatou-se um aumento expressivo de óxidos na superfície da ferramenta, acompanhada pela detecção de vários elementos químicos.

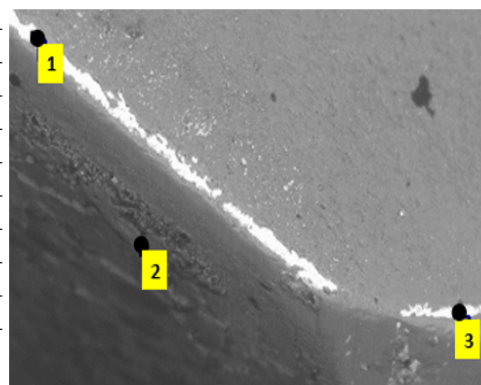
A presença de ferro (Fe), manganês (Mn) e cromo (Cr) em alguns pontos sugere adesão de material da peça na ferramenta, enquanto o cobalto (Co), identificado no Ponto 1, pode indicar desgaste do revestimento com exposição do substrato da ferramenta. Elementos como sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) sugerem contaminação por fluido de corte.

Esses resultados indicam que o desgaste ocorreu de maneira diferenciada ao longo da ferramenta, influenciado por variáveis como temperatura, pressão de corte e composição do material usinado.

Figura 58 - Resultado da análise EDS dos pontos selecionados (Ponteira C)

	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3
Nitrogênio (N)	7,08		
Oxigênio (O)	1,97	2,35	36,78
Alumínio (Al)	1,23		1,36
Titânio (Ti)	2,03	0,58	1,62
Cromo (Cr)	0,47	1,86	
Ferro (Fe)	1,41		10,37
Cobalto (Co)	12,42		
Mangânes (Mn)			0,77
Tungstênio (W)	64,83	84,39	
		1,51 (Na)	10,25 (Ca)
		1,54 (Mg)	1,05 (K)
		11,60 (P)	0,18 (S)
		0,61 (Cl)	0,90 (Si)

Outros

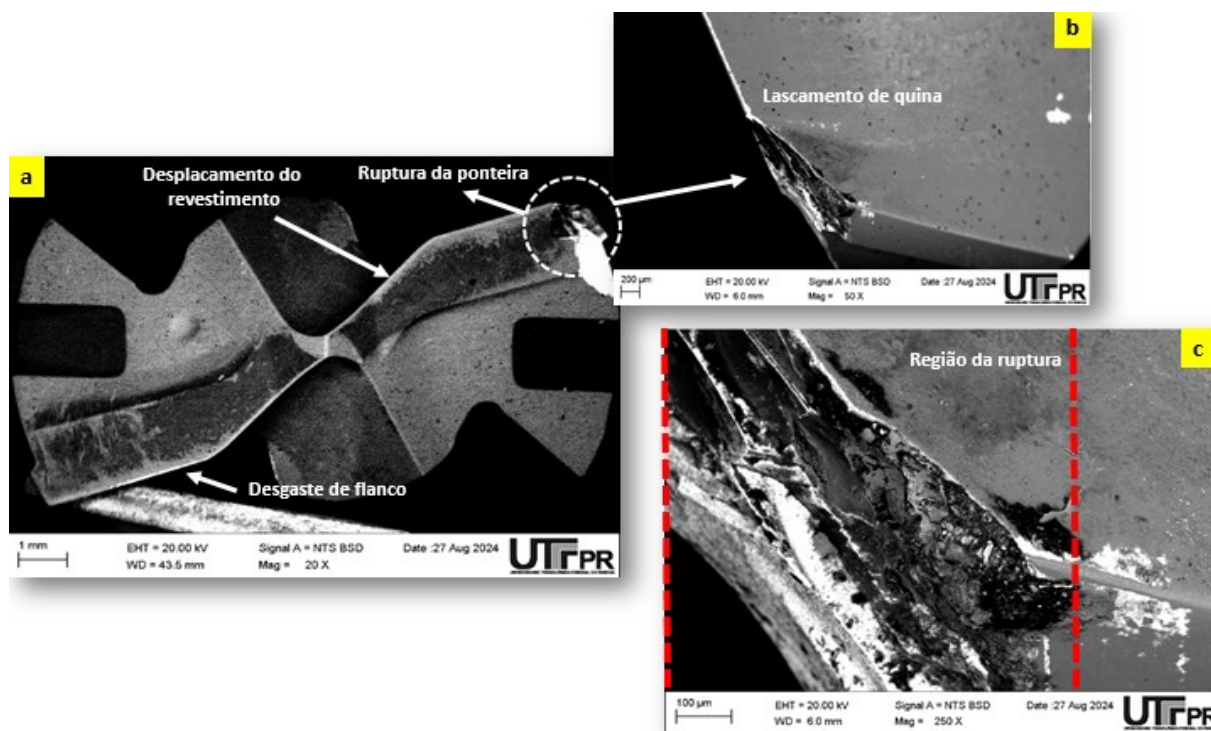
**Fonte: Autoria própria (2026)**

4.1.4 Desgaste ponteira D

Os modelos de ponteiras B e D apresentam geometria com dupla margem, o que resulta em um aumento significativo da área de contato lateral entre a ferramenta e a parede do furo quando comparados aos modelos de margem simples. Essa configuração pode favorecer a estabilidade dimensional e a circularidade do furo, porém também amplia a zona de contato contínuo durante a usinagem.

Com o avanço do processo de furação, a extensão dessa zona de contato dificulta a renovação eficiente do fluido de corte ao longo da parede do furo, especialmente em condições de maior profundidade. Como consequência, ocorre degradação progressiva das propriedades do lubrificante, associada ao aumento de temperatura, redução da viscosidade e possível vaporização parcial do fluido. Esse cenário favorece a transição para um regime de lubrificação deficiente, elevando o atrito na interface ferramenta-peça, intensificando a geração de calor e contribuindo para a aceleração dos mecanismos de desgaste, o que pode explicar o comportamento observado para esses modelos de ponteira (LI; LIU; CHEN, 2023). A Figura 59 evidencia regiões de desgaste e micro-lascamentos na aresta de corte, os quais não estão relacionados a impactos mecânicos, mas podem ser atribuídos à concentração de tensões térmicas e mecânicas na interface ferramenta-peça. Esse comportamento é potencializado pelo aumento da área de contato lateral decorrente da geometria com dupla margem, favorecendo a fragilização local da aresta e a nucleação de microfraturas.

Figura 59 – a) Regiões de desgaste; b) Lascamento de quina; c) vista aproximada da região de ruptura da ponteira (lascamento)



Fonte: Autoria própria (2026)

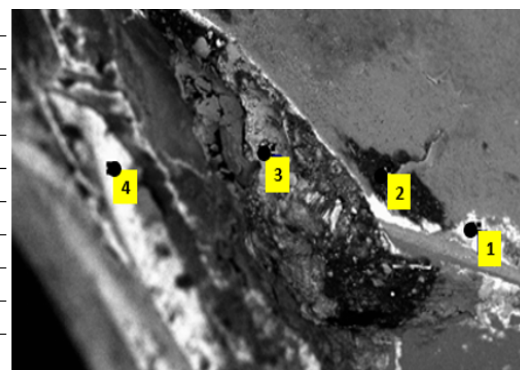
A análise química (Figura 60) dos pontos de desgaste da ferramenta revela padrões distintos de degradação após o processo de furação. O ferro (Fe) aparece em alta concentração nos Pontos 1 e 3, sugerindo exposição da matriz da ferramenta devido ao desgaste progressivo do revestimento, ou seja, volume significativo de adesão de aço na ponteira. Esse atrito contínuo contribuiu para a aceleração dos processos de desgaste e fragilização, levando a ferramenta ao estado de ruptura, como observado no modelo de ponteira em estudo.

Já o aumento significativo do oxigênio (O) nos Pontos 2 e 3 sugere processos de oxidação avançados, que podem comprometer a resistência da superfície da ferramenta. No ponto 4 o tungstênio (W), predominante indica exposição do substrato do metal-duro.

O desgaste do revestimento PVD de TiAlN é evidenciado pela oscilação das concentrações de alumínio (Al) e titânio (Ti). Além disso, elementos como cromo (Cr) e silício (Si) refletem a adesão de material da peça sobre a ferramenta influenciando a degradação da superfície da ponteira.

Figura 60 - Resultado da análise EDS dos pontos selecionados (Ponteira D)

	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4
Fósforo (P)		2,57	0,42	0,57
Oxigênio (O)	5,39	28,41	36,19	9,45
Alumínio (Al)	1,39	6,16		
Titânio (Ti)	0,90	1,98		
Cromo (Cr)		4,06		0,34
Ferro (Fe)	83,96	21,54	61,88	5,58
Cobalto (Co)		5,52		6,13
Mangânes (Mn)	1,28		1,06	
Tungstênio (W)	2,77			59,79
	0,81 (Na)	1,48 (Na)	0,44 (Cl)	0,40 (Ca)
	0,35 (Mg)	7,76 (Si)		0,40 (Ca)
	0,61 (K)	2,45 (K)		
	0,35 (Si)	1,43 (S)		
	0,87 (Ca)	5,05 (Ca)		
Outros	0,66 (Cl)	11,59 (Cl)		



Fonte: Autoria própria (2026)

Esses resultados demonstram que o desgaste ocorreu de modo severo e heterogêneo, com ocorrência de micro-lascamentos e degradação avançada do revestimento. Esse comportamento evidencia elevada solicitação térmica e mecânica na interface ferramenta-peça.

4.2 Desgaste de Flanco (VB)

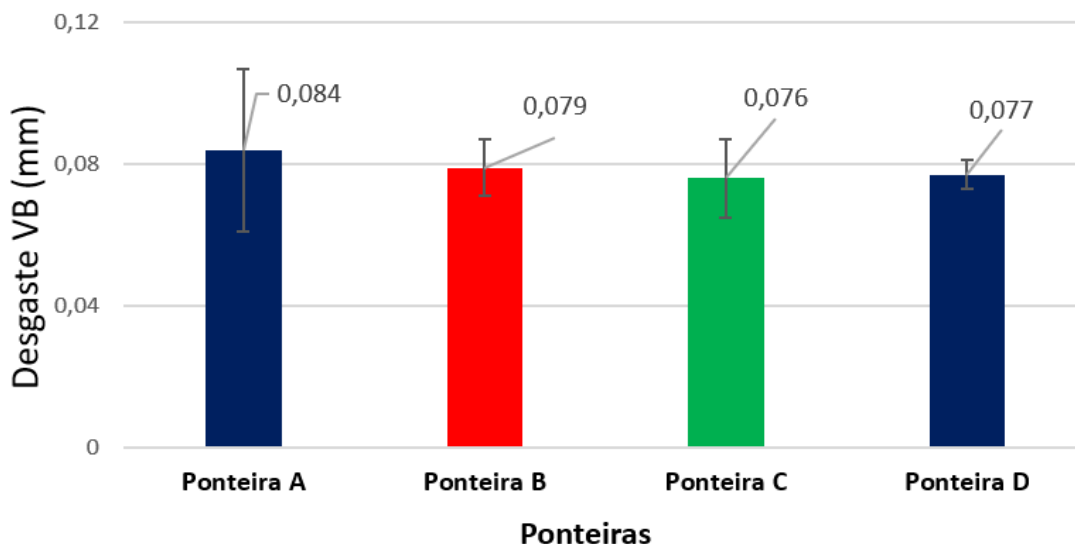
Neste tópico são discutidos os resultados de desgaste de flanco (VB) das quatro ponteiros avaliadas no processo de furação. As medições foram realizadas individualmente por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), adotando-se como critério a largura média da marca de desgaste na superfície de folga, permitindo comparar a influência da posição e da geometria da aresta sobre a progressão do desgaste (Apêndice A).

Considerando o número reduzido de repetições experimentais ($n = 2$), optou-se por uma abordagem baseada em estatística descritiva, utilizando os valores médios de desgaste de flanco (VB), acompanhados de seus respectivos desvios padrão. Essa abordagem permite avaliar a variabilidade dos dados e identificar tendências no comportamento das diferentes geometrias de ponteiros, sem recorrer exclusivamente a métodos estatísticos inferenciais, cuja robustez é limitada nesse cenário.

A representação dos resultados por meio de barras de erro possibilita uma análise visual da dispersão dos dados, contribuindo para a interpretação comparativa

entre as condições avaliadas. Os valores médios de desgaste de flanco (VB) para as diferentes ponteiras analisadas são apresentadas no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Dados desgaste de Flanco (VB)



Fonte: Autoria própria (2026)

As barras representam os valores médios de desgaste de cada ponteira, obtidos a partir das medições no flanco principal 1 e no flanco principal 2, resultando em duas medições por ponteira, conforme apresentado no Apêndice 1.

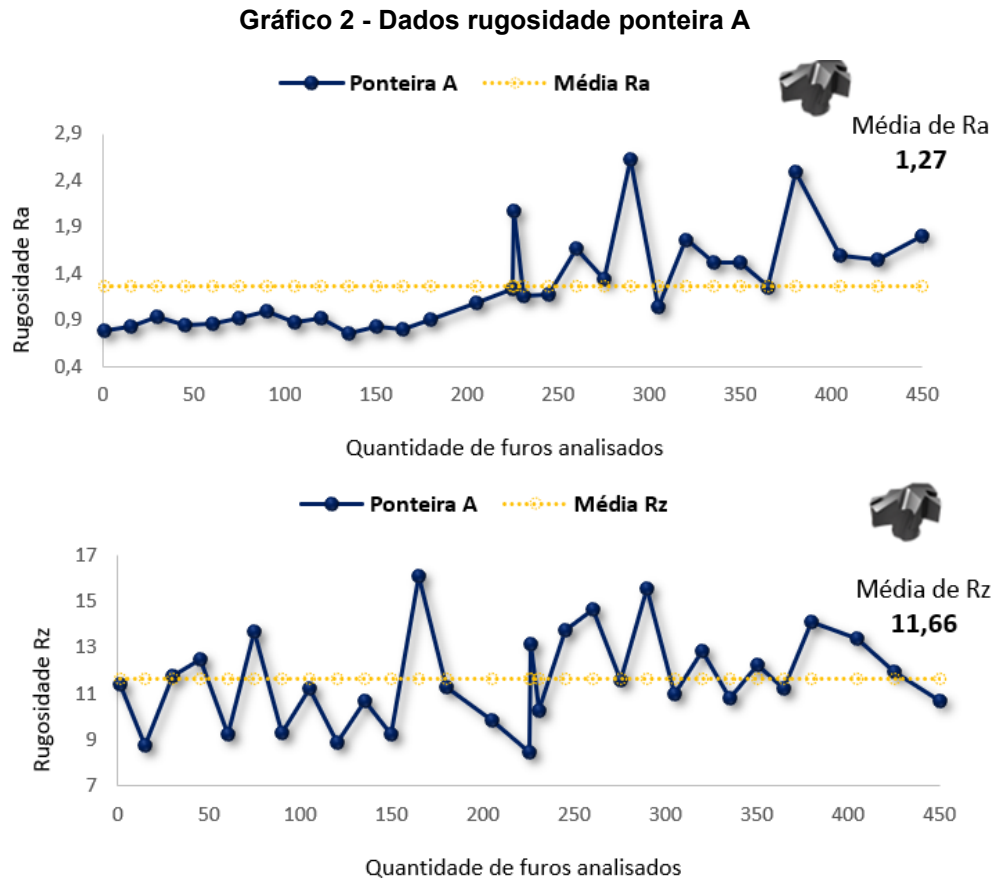
O gráfico de desgaste de flanco (VB) indica valores próximos entre as ponteiras, com comportamento semelhante dentro da variabilidade experimental, evidenciado pela sobreposição das barras de erro.

Entretanto, a análise isolada do VB não é suficiente para avaliar o desempenho das ferramentas, por estar associada a um mecanismo de desgaste progressivo. Assim, torna-se necessário considerar também falhas como lascamento e ruptura, que exercem maior influência na vida útil da ferramenta.

4.3 Análise da rugosidade

A caracterização da rugosidade foi realizada por meio da seleção de 30 furos distribuídos ao longo das placas usinadas de cada corpo de prova. O procedimento foi conduzido em duas etapas sequenciais, totalizando 225 furos por fase, com a mensuração dos parâmetros de rugosidade Ra (rugosidade média aritmética) e Rz

(altura média máxima do perfil) para cada modelo de ponteira avaliado. No Gráfico 2 é demonstrado os resultados de rugosidade da ponteira A.



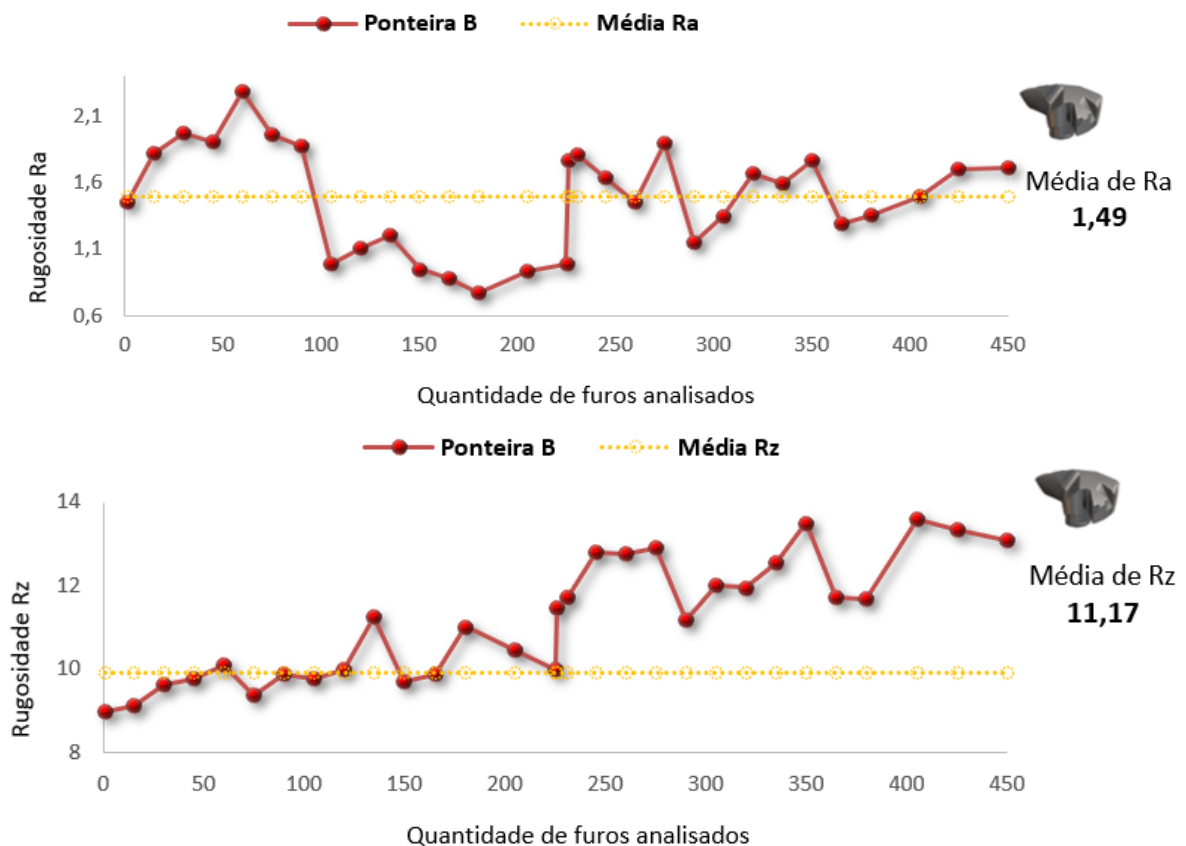
Fonte: Autoria própria (2026)

A ponteira A apresentou comportamento estável em relação à rugosidade ao longo do processo de usinagem. Nos primeiros 225 furos, os valores médios de Ra e Rz foram de 0,90 μm e 10,83 μm . Nos 225 furos subsequentes, observou-se aumento desses parâmetros, com Ra de 1,63 μm e Rz de 12,48 μm . A média consolidada dos 450 furos foi de Ra igual a 1,27 μm e Rz de 11,66 μm , indicando que, apesar do desempenho satisfatório ao longo do ensaio, houve elevação da rugosidade média e da amplitude entre picos e vales na segunda metade do processo, evidenciando desgaste progressivo da ponteira e redução da uniformidade superficial à medida que o comprimento usinado aumentou.

Já a ponteira B apresentou, nos primeiros 225 furos, valores médios de rugosidade de Ra de 1,40 μm e Rz de 9,92 μm . Na segunda etapa do ensaio, correspondente aos 225 furos subsequentes, verificou-se aumento para Ra de 1,57 μm e Rz de 12,41 μm . A média global dos 450 furos foi de Ra de 1,49 μm e Rz de

11,17 μm . A elevação mais pronunciada de Rz em relação a Ra indica intensificação das irregularidades superficiais associadas à formação de picos e vales mais acentuados. Esse comportamento está diretamente relacionado ao lascamento observado na aresta de corte, o qual promoveu instabilidade geométrica da ferramenta e comprometeu a integridade superficial do furo. Os dados obtidos de rugosidade dos 450 furos são demonstrados no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Dados rugosidade ponteira B

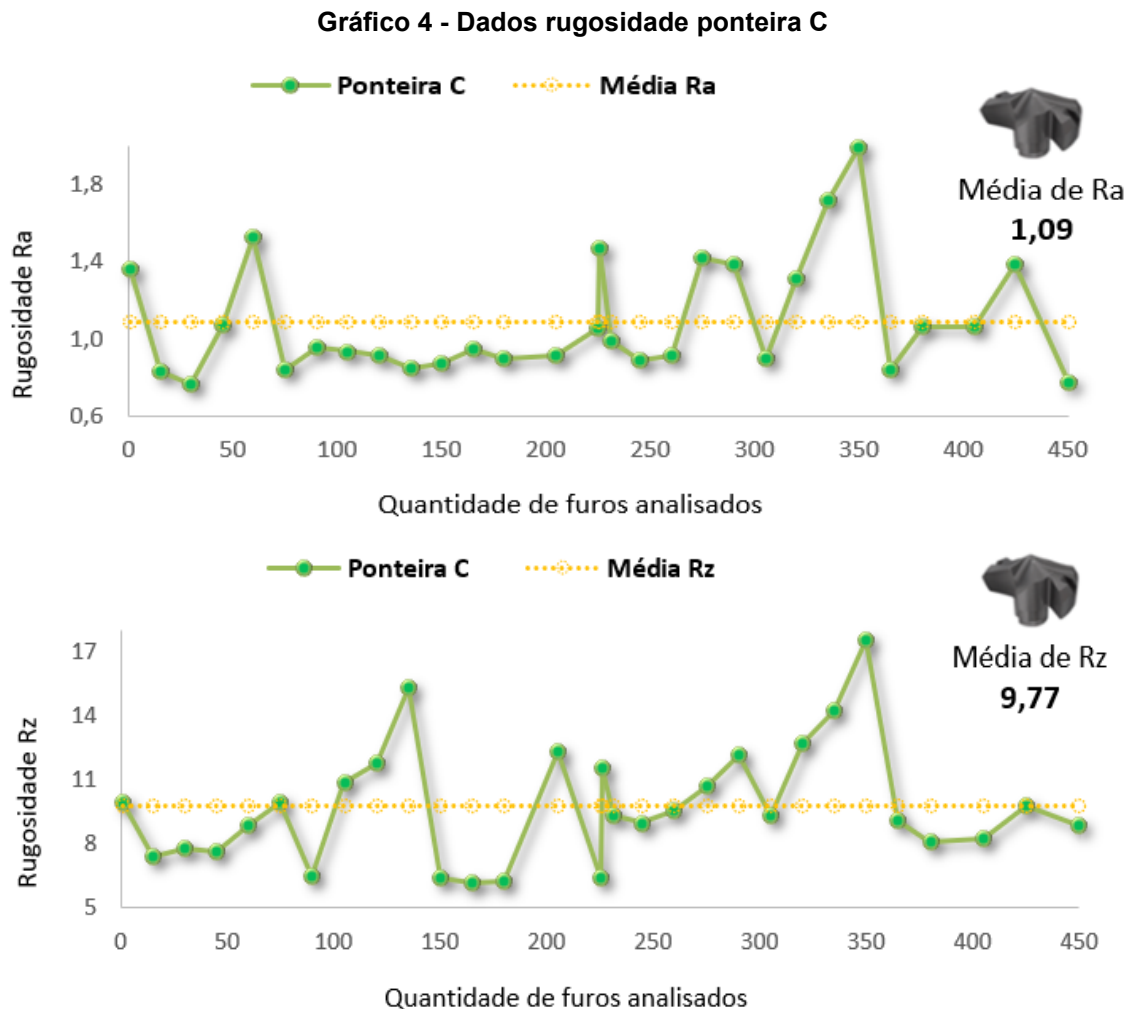


Fonte: Autoria própria (2026)

A ponteira C apresentou, nos primeiros 225 furos, valores médios de rugosidade de $Ra = 0,98 \mu\text{m}$ e $Rz = 8,89 \mu\text{m}$. Na etapa subsequente, correspondente aos 225 furos finais, verificou-se incremento desses parâmetros para $Ra = 1,20 \mu\text{m}$ e $Rz = 10,66 \mu\text{m}$. A média global dos 450 furos foi de $Ra = 1,09 \mu\text{m}$ e $Rz = 9,77 \mu\text{m}$. A elevação simultânea de Ra e Rz na segunda metade do ensaio evidencia deterioração progressiva da integridade superficial, associada ao avanço do desgaste da ferramenta. Embora os valores consolidados permaneçam em faixa compatível com desempenho satisfatório, observa-se tendência de perda gradual de uniformidade

superficial ao longo do comprimento usinado, caracterizando influência direta do tempo de uso da ponteira sobre os parâmetros de rugosidade.

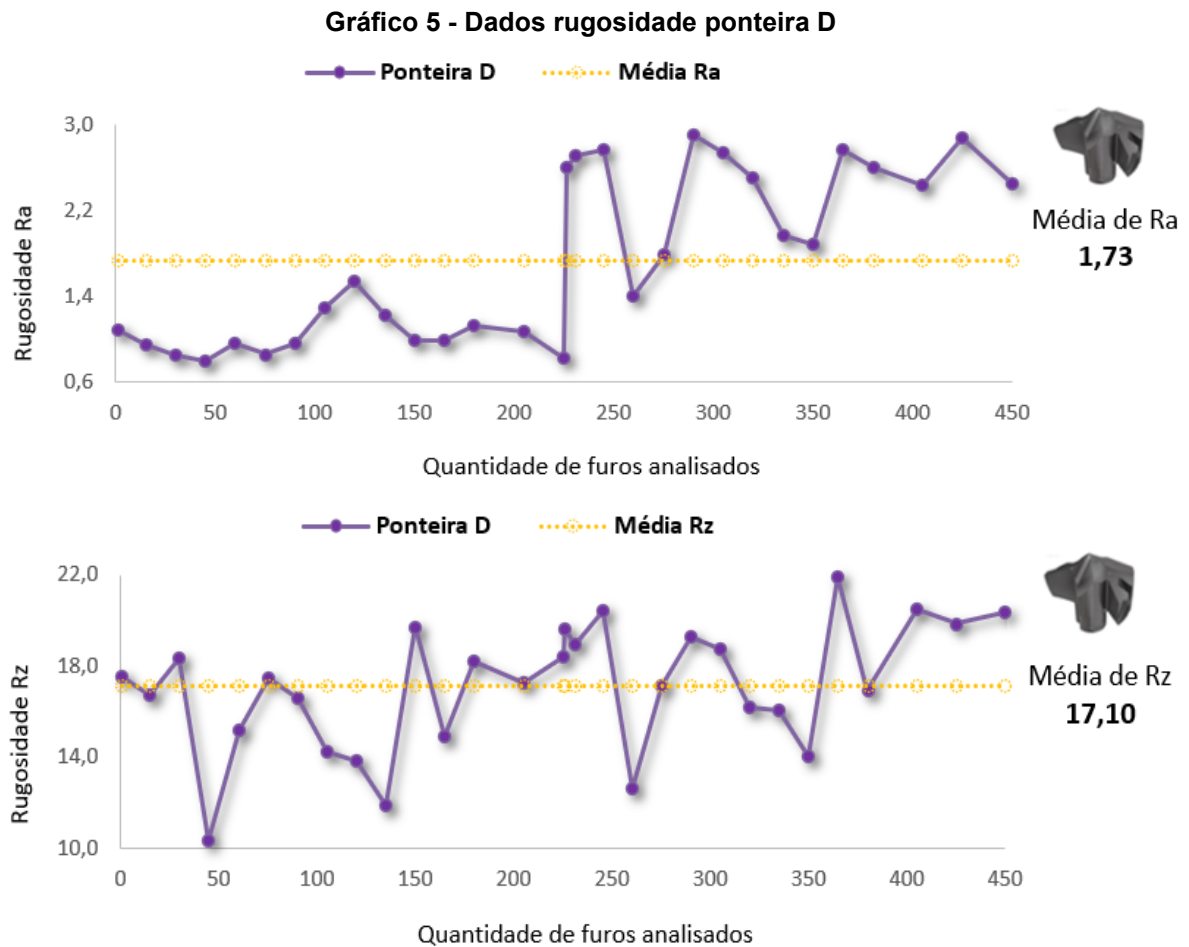
Os resultados de rugosidade da ponteira C dos 450 furos são demonstrados no Gráfico 4.



Fonte: Autoria própria (2026)

A ponteira D apresentou, nos primeiros 225 furos, valores de rugosidade de Ra de 1,03 μm e Rz de 16,03 μm . Na etapa subsequente, verificou-se aumento expressivo para Ra de 2,42 μm e Rz de 18,16 μm . A média global dos 450 furos foi de Ra de 1,73 μm e Rz de 17,10 μm . O crescimento acentuado de Ra na segunda metade do ensaio evidencia deterioração significativa da qualidade superficial ao longo do processo, enquanto os elevados valores de Rz em ambas as etapas indicam predominância de irregularidades profundas, caracterizadas por grande amplitude entre picos e vales. Esse comportamento está diretamente associado à ruptura da ponteira durante a usinagem, configurando falha estrutural que comprometeu a

estabilidade geométrica da aresta de corte. Diferentemente das demais ferramentas avaliadas, a variação dos parâmetros de rugosidade não se limita ao desgaste progressivo, mas reflete a ocorrência de um mecanismo de falha abrupto, resultando em perda acentuada de previsibilidade e controle da integridade superficial. Os resultados de rugosidade da ponteira D dos 450 furos são demonstrados no Gráfico 5.



Fonte: Autoria própria (2026)

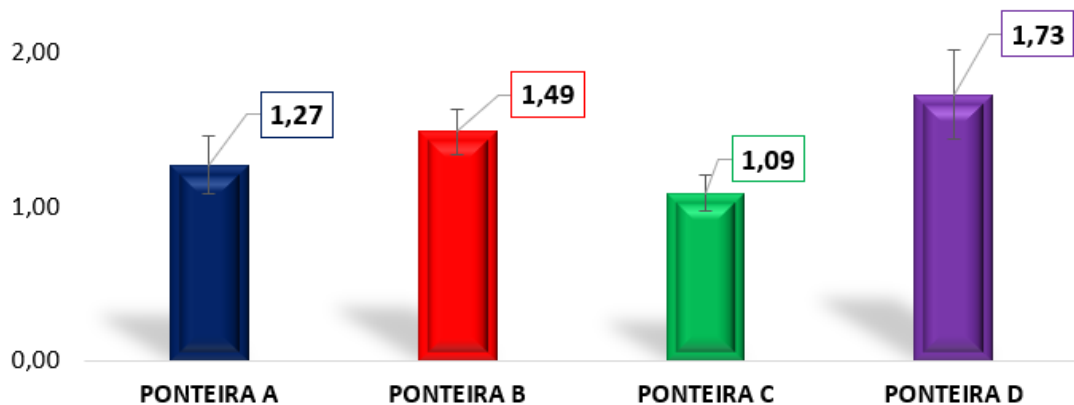
O Gráfico 6 apresenta a média dos parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) ao longo dos 450 furos. A ponteira C apresentou os menores valores (Ra de 1,09 μm e Rz de 9,77 μm), indicando maior estabilidade e melhor integridade superficial. As ponteiros A e B apresentaram desempenho intermediário, com aumento progressivo da rugosidade, sendo que na ponteira B o lascamento contribuiu para a elevação de Rz. A ponteira D apresentou os maiores valores (Ra de 1,73 μm e Rz de 17,10 μm), associados à ruptura da ferramenta, comprometendo o processo. A análise conjunta de Ra e Rz demonstra comportamento consistente, com o Rz evidenciando de forma mais acentuada as diferenças entre as condições. A reduzida sobreposição das barras

de erro reforça os indícios visuais de diferença entre os grupos, especialmente entre as condições extremas, embora a confirmação estatística deva ser realizada por ANOVA.

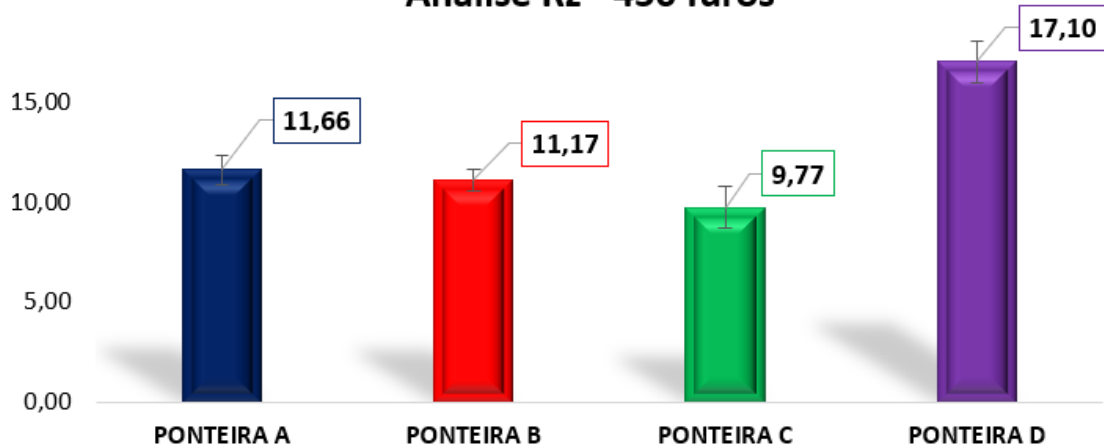
Esses resultados se complementam ao tópico 4.2.5, relacionado ao desgaste após a usinagem.

Gráfico 6 - Análise estatística das rugosidades Ra e Rz

Análise Ra - 450 furos



Análise Rz - 450 furos



Fonte: Autoria própria (2026)

A partir dos resultados obtidos, foi realizada a ANOVA para as médias das rugosidades (Ra e Rz), visando à sua análise com maior clareza. De acordo com a Tabela 7 da ANOVA, observa-se que o valor de F calculado é maior que o $F_{\text{crítico}}$ e o valor-p é muito menor que 0,05, evidenciando que existe diferença estatisticamente significativa entre pelo menos dois grupos de ponteiros intercambiáveis em relação a rugosidade de Ra.

Tabela 7 - Análise de variância rugosidade Ra

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,8153	3	2,271774	8,1328	5,822E-05	2,6828
Dentro dos grupos	32,4028	116	0,279335			
Total	39,2182	119				

Fonte: Autoria própria (2026)

Como a dispersão entre as médias observadas foi superior ao valor crítico estabelecido, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey com o objetivo de identificar quais grupos de ponteiros apresentavam diferenças estatisticamente significativas entre si. O valor crítico de q foi obtido a partir da distribuição Studentized Range, conforme descrito por Douglas C. Montgomery (2013), considerando K = 4 grupos, e gl = 116 sendo o nível de significância de $\alpha = 0,05$, resultando em $q_{crítico} \approx 3,63$.

Os resultados do teste de Tukey demonstraram diferenças estatisticamente significativas entre alguns dos grupos avaliados em relação à rugosidade média Ra. A ponteira D apresentou diferença significativa quando comparado ao grupo A e C. Adicionalmente, a ponteira B também diferiu significativamente da ponteira C. Em contrapartida, não foram verificadas diferenças estatisticamente significativas entre o grupo A e B, assim como entre B e D, uma vez que as diferenças entre suas médias permaneceram inferiores ao valor da diferença honestamente significativa (DHS = 0,35). Os dados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Teste Tukey da rugosidade Ra

	PONTEIRA A	PONTEIRA B	PONTEIRA C	PONTEIRA D
PONTEIRA A		0,22	0,17	0,46
PONTEIRA B			0,39	0,24
PONTEIRA C				0,64
PONTEIRA D				

Fonte: Autoria própria (2026)

Com base na análise de variância (ANOVA) aplicada também para os dados de rugosidade Rz demonstrados na Tabela 9, observou-se que o valor de F = 58,18, consideravelmente superior ao F crítico = 2,68, com um valor-P extremamente baixo

($5,02 \times 10^{-23}$). Esses resultados indicam que há diferenças estatisticamente significativas entre os grupos analisados quanto à rugosidade Rz.

Tabela 9 - Análise de variância rugosidade Rz

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	827,0364	3	275,6788	58,18263	5,02E-23	2,682809
Dentro dos grupos	549,6269	116	4,738163			
Total	1376,6633	119				

Fonte: Autoria própria (2026)

A variabilidade entre os grupos é substancialmente maior que a variabilidade dentro dos grupos, justificando a aplicação de um teste de Tukey, para identificar quais pares de grupos apresentam diferenças significativas. O valor de $q_{crítico} \approx 3,63$ também para o caso do Rz.

A análise de comparações múltiplas pelo teste de Tukey indicou que a ponteira D apresenta média estatisticamente superior aos demais grupos, diferindo significativamente de todos eles. A ponteira A também apresentou diferença significativa em relação a ponteira C. Por outro lado, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre o grupo A e B, nem entre B e C, uma vez que as diferenças entre suas médias foram inferiores ao valor do DHS (1,46), conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Teste Tukey da rugosidade Rz

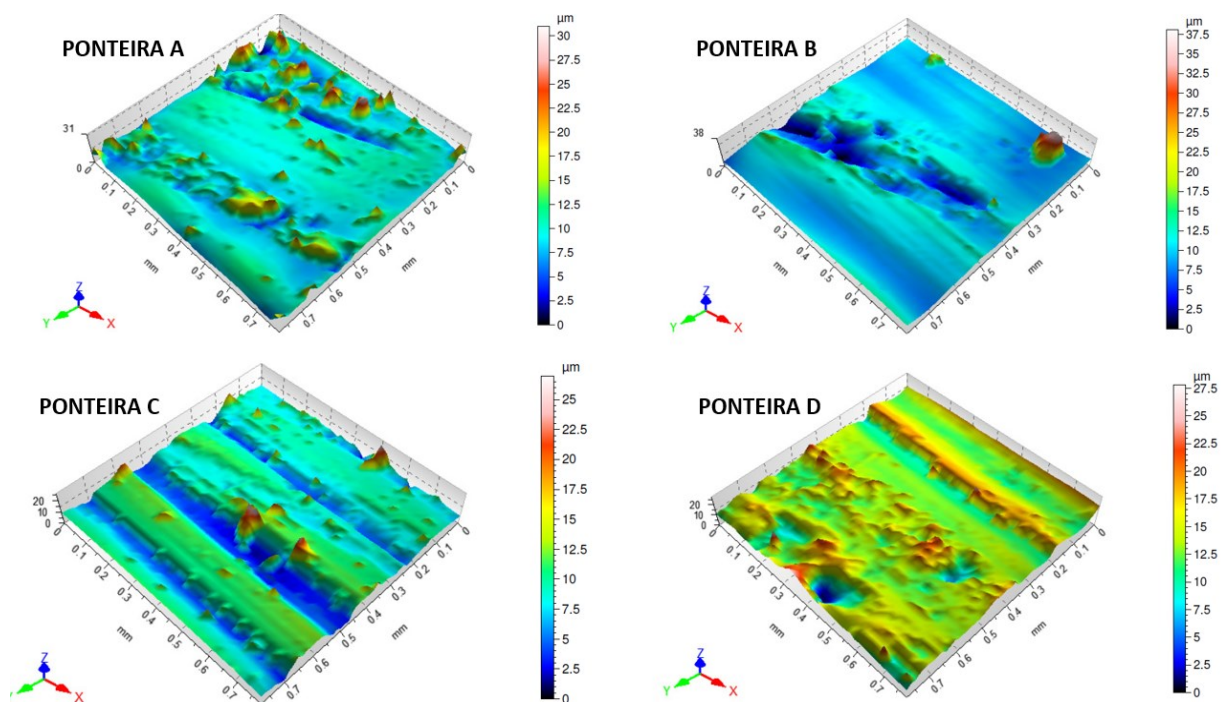
	PONTEIRA A	PONTEIRA B	PONTEIRA C	PONTEIRA D
PONTEIRA A		0,91	1,95	4,90
PONTEIRA B			1,04	5,81
PONTEIRA C				6,84
PONTEIRA D				

Fonte: Autoria própria (2026)

A análise estatística por ANOVA seguida do teste de Tukey revelou diferenças significativas entre os métodos de furação quanto à rugosidade Ra e Rz. O método C apresentou os menores valores em ambos os parâmetros, evidenciando melhor desempenho no acabamento superficial. Já a ponteira D apresentou as maiores

médias de rugosidade, caracterizando desempenho inferior no acabamento superficial. As maiores diferenças ocorreram entre C e D, com 6,58 μm para R_a e 17,22 μm para R_z . Esses resultados confirmam que a escolha da ponteira influencia diretamente na qualidade da superfície usinada. Portanto a ponteira C é recomendada para aplicações que exigem melhor acabamento. De forma complementar à análise dos parâmetros de rugosidade obtidos por meio da caracterização bidimensional (2D), é apresentado na Figura 61 as representações tridimensionais (3D) das superfícies usinadas para cada modelo de ponteira avaliado. Embora os parâmetros quantitativos discutidos neste trabalho estejam baseados nas medições de rugosidade 2D, as imagens tridimensionais são incluídas como recurso adicional para a visualização da topografia superficial gerada durante o processo de furação, permitindo uma interpretação mais abrangente das características morfológicas da superfície.

Figura 61 – Representação tridimensional das ponteiras



Fonte: Autoria própria (2026)

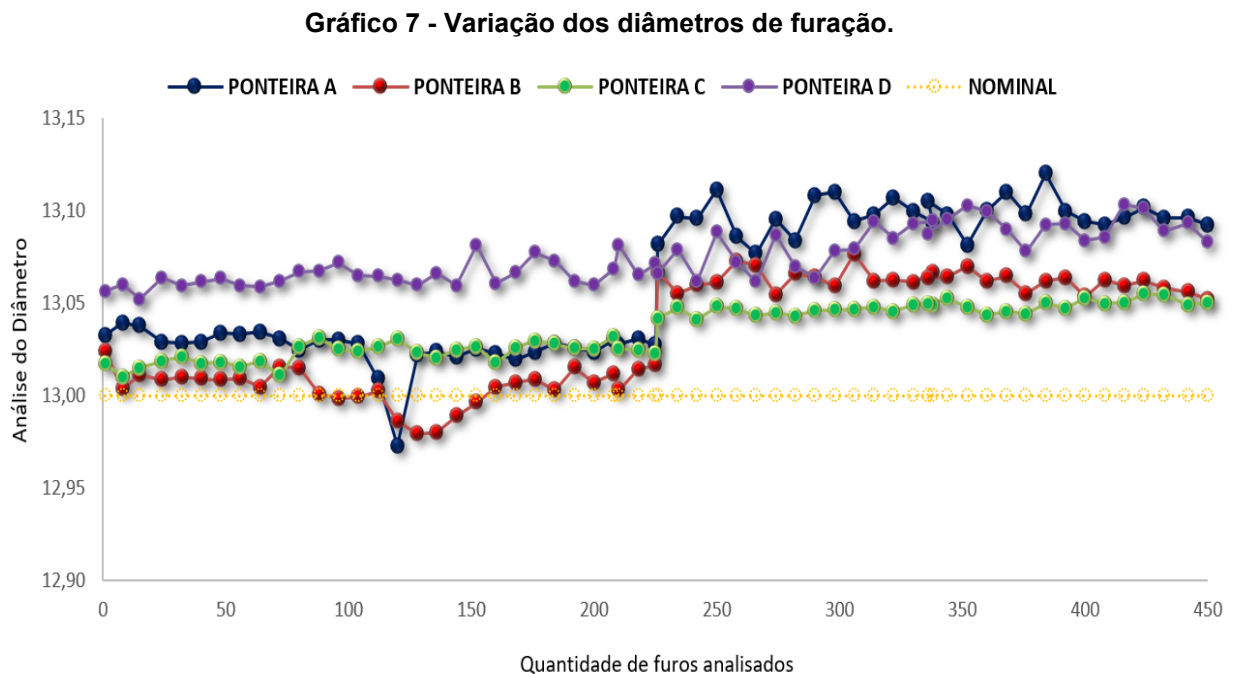
A análise da topografia superficial apresentou comportamento consistente com os resultados de rugosidade bidimensional (R_a e R_z), mantendo a ordem de desempenho entre as ponteiras avaliadas, o que valida a confiabilidade dos dados obtidos. A ponteira C destacou-se pela maior uniformidade superficial, com menores variações topográficas e reduzida diferença entre picos e vales, indicando melhor

qualidade de acabamento, associada à maior estabilidade do corte e à geometria favorável da aresta.

As ponteiros A e B apresentaram desempenho intermediário, com pequenas diferenças entre si, sendo que a análise tridimensional permitiu uma melhor visualização da distribuição espacial das irregularidades superficiais. Em contrapartida, a ponteira D apresentou maior variação topográfica, com picos e vales mais acentuados, evidenciando maior irregularidade superficial, possivelmente relacionada à progressão do desgaste e à alteração da geometria da aresta de corte. Dessa forma, a integração das análises 2D e 3D mostrou-se essencial para uma avaliação completa da integridade superficial, permitindo não apenas quantificar a rugosidade, mas também compreender os mecanismos envolvidos na sua formação.

4.4 Análise dos diâmetros

A avaliação dimensional dos diâmetros apresentas no Gráfico 7 foi conduzida por meio da seleção de 60 furos distribuídos ao longo dos 450 furos realizados nas placas correspondentes a cada corpo de prova.



Fonte: Autoria própria (2026)

A ponteira C apresentou o menor intervalo dimensional, com diâmetro máximo de aproximadamente 13,05 mm e mínimo de 13,01 mm, resultando em variação da

ordem de 40 μm , além de baixa dispersão ao longo da sequência de furos. Esse comportamento demonstra elevada repetibilidade e maior controle da precisão dimensional, mesmo com o avanço do comprimento usinado. O desempenho observado pode estar associado à sua geometria auto-centrante e às arestas de corte côncavas, características que proporcionam maior estabilidade durante a furação e redução de desvios na entrada da ferramenta, favorecendo maior precisão dimensional e melhor controle da circularidade dos furos.

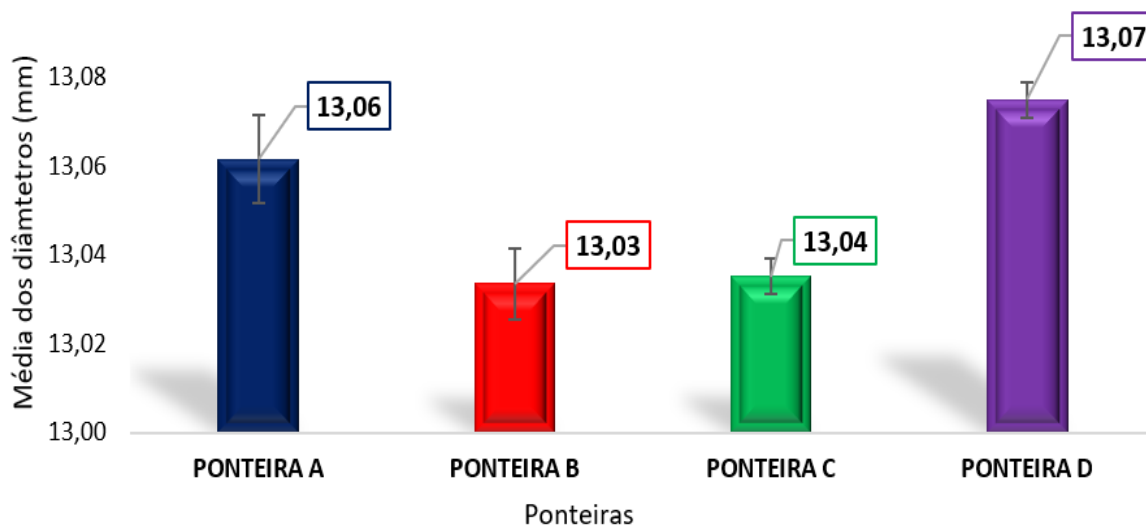
A ponteira A apresentou maior amplitude dimensional, correspondendo a uma diferença próxima de 150 μm . Observou-se tendência de crescimento do diâmetro na segunda metade do ensaio, comportamento compatível com desgaste progressivo e possível influência térmica acumulada, impactando a estabilidade dimensional. Esse comportamento pode estar relacionado à sua geometria convencional com margem simples, que apresenta menor capacidade de estabilização lateral durante o processo de furação, favorecendo maior dispersão dimensional ao longo da usinagem.

A ponteira B demonstrou variação moderada, com aumento gradual na etapa final. Esse comportamento está associado ao lascamento concentrado na região da guia, fator que altera localmente a geometria ativa da ferramenta e compromete a repetibilidade dimensional. Entretanto, a presença da dupla margem de guia contribuiu para maior estabilidade durante a usinagem, além de favorecer melhor cilindricidade, retilidade e acabamento superficial dos furos, reduzindo parcialmente a dispersão dimensional observada.

Por sua vez, a ponteira D apresentou tendência de crescimento mais pronunciada ao longo do ensaio, atingindo valores superiores a 13,10 mm. Esse comportamento está diretamente relacionado à ocorrência de ruptura da ferramenta, configurando falha estrutural que comprometeu o controle dimensional e reduziu a previsibilidade do processo de furação. Apesar disso, sua geometria com capacidade de auto-centragem aprimorada foi desenvolvida para proporcionar maior estabilidade, melhor circularidade e maior precisão dimensional dos furos, características que podem ter sido comprometidas pela falha ocorrida durante o ensaio.

O Gráfico 8 apresenta as médias dos diâmetros obtidos para os diferentes grupos avaliados, acompanhadas de barras de erro representando os intervalos de confiança de 95%. A reduzida sobreposição parcial dos intervalos de confiança entre alguns grupos aponta a existência de diferenças entre determinadas condições experimentais, vindo a ser avaliada pela análise de variância (ANOVA) na sequência.

Gráfico 8 - Média dos diâmetros de furação



Fonte: Autoria própria (2026)

Para análise dos resultados foi executado a análise de variância (ANOVA), onde indicou diferença estatisticamente significativa entre os grupos avaliados quanto ao diâmetro final dos furos. O valor de F calculado (36,95) foi superior ao F crítico (2,64), levando à rejeição da hipótese nula. Além disso, o valor de p extremamente baixo ($1,30 \times 10^{-19}$), inferior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), reforça essa conclusão. Esses resultados indicam que há diferença estatisticamente significativa entre os grupos analisados em relação ao diâmetro final, representados na Tabela 11.

Tabela 11 – Análise de variância do diâmetro

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,074678	3	0,024893	36,94836	1,3E-19	2,642851
Dentro dos grupos	0,158996	236	0,000674			
Total	0,233674	239				

Fonte: Autoria própria (2026)

Os resultados apresentados na Tabela 12 da análise de comparações múltiplas pelo teste de Tukey mostrou que a ponteira D apresentou diferença estatisticamente significativa em relação ao grupo B e C. A ponteira A também diferiu significativamente dos demais grupos. Por outro lado, não foi observada diferença

estatisticamente significativa entre o grupo B e C, uma vez que a diferença entre suas médias foi inferior ao valor do DHS (0,01).

Tabela 12 - Teste tukey diâmetro

	PONTEIRA A	PONTEIRA B	PONTEIRA C	PONTEIRA D
PONTEIRA A		0,03	0,03	0,01
PONTEIRA B			0,00	0,04
PONTEIRA C				0,04
PONTEIRA D				

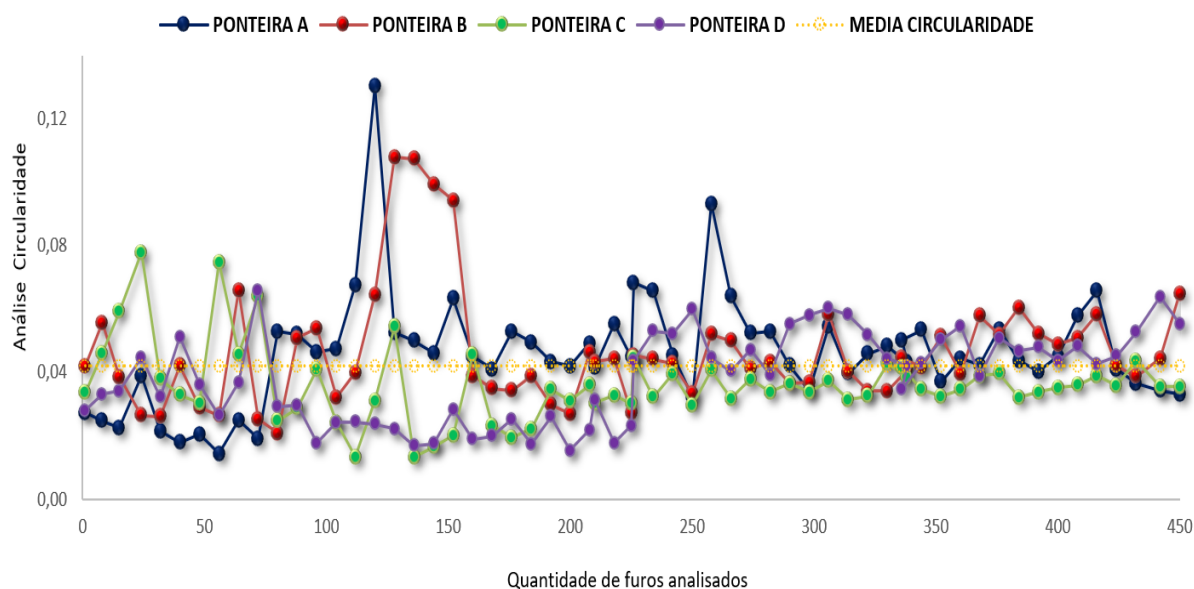
Fonte: Autoria própria (2026)

De modo geral, os resultados demonstram que as diferentes ponteiras influenciaram significativamente o diâmetro final dos furos. A ponteira D apresentou os maiores valores médios de diâmetro, enquanto o grupo B e C apresentaram os menores valores médios. Os resultados da ponteira B mostraram-se compatíveis com o esperado para ponteiras de dupla margem, em função do maior efeito de guia da ferramenta, enquanto a ponteira C apresentou desempenho superior, indicando maior influência da geometria autocentrante na precisão dimensional dos furos. Embora as diferenças entre as médias sejam numericamente pequenas, a baixa variabilidade experimental associada ao elevado número de medições contribuiu para a identificação de diferenças estatisticamente significativas, evidenciando a elevada sensibilidade do processo de usinagem às condições analisadas.

4.5 Análise das circularidades

As medições de circularidade foram conduzidas com a mesma metodologia aplicada à análise dos diâmetros, utilizando 60 furos distribuídos ao longo das placas usinadas para cada modelo de ponteira, garantindo representatividade ao longo do ensaio.

O Gráfico 9 apresenta que os resultados evidenciaram diferenças no comportamento da circularidade entre as ponteiras ao longo do ensaio, principalmente em relação à dispersão dos valores e à estabilidade do processo.

Gráfico 9 - Análise das circularidades das ponteiros

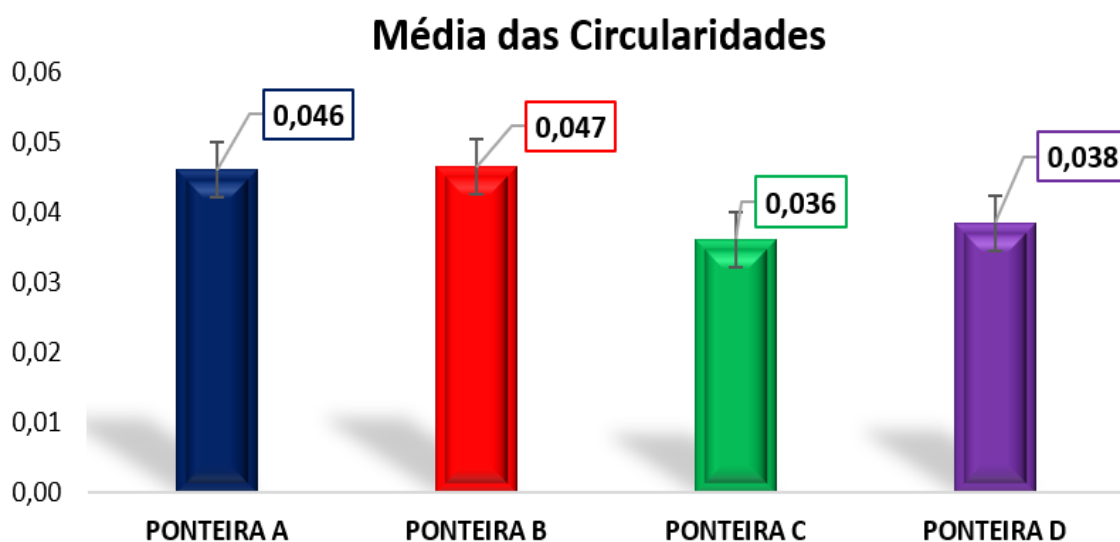
Fonte: Autoria própria (2026)

O Gráfico 10 demonstra elevada sobreposição entre o grupo A e B, indicando grande proximidade entre os valores médios de circularidade e sugerindo comportamento estatisticamente semelhante entre essas condições. Os grupos apresentaram médias de 0,046 mm e 0,047 mm, respectivamente, evidenciando diferença numérica reduzida entre os resultados obtidos. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de ambas as ponteiros pertencerem à mesma família geométrica de corte, embora a ponteira B possua dupla margem de guia, característica desenvolvida para melhorar a estabilidade e a qualidade geométrica dos furos. Entretanto, o desgaste e o lascamento observados na região da guia podem ter limitado parte desse benefício durante o ensaio.

Também foi observada sobreposição entre o grupo C e D, que apresentaram médias de 0,036 mm e 0,038 mm, respectivamente, indicando proximidade entre os valores médios dessas condições experimentais. A ponteira C apresentou o menor valor médio de circularidade, comportamento associado à sua geometria auto-centrante e às arestas de corte côncavas, que favorecem maior estabilidade da ferramenta e redução de desvios durante a entrada e propagação da furação. De forma semelhante, a geometria da ponteira D também foi desenvolvida para proporcionar melhor auto-centragem e estabilidade geométrica dos furos, contribuindo para menores valores de circularidade quando comparado ao grupo A e B.

Apesar dessas diferenças numéricas, a presença de sobreposição entre alguns intervalos de confiança sugere que determinadas comparações podem não apresentar diferenças estatisticamente significativas. Por outro lado, a reduzida amplitude das barras de erro evidencia baixa dispersão experimental e boa repetibilidade dos resultados obtidos para as amostras analisadas.

Gráfico 10 – Média das circularidades



Fonte: Autoria própria (2026)

A análise de variância (ANOVA) representado na Tabela 13 indicou diferença estatisticamente significativa entre os grupos avaliados em relação à circularidade dos furos. O valor de F calculado (6,74) foi superior ao F crítico (2,64), levando à rejeição da hipótese nula. Além disso, o valor de p (0,000221), inferior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), reforça essa conclusão. Esses resultados demonstram que as diferentes condições analisadas influenciaram significativamente os valores de circularidade obtidos.

Tabela 13 - Análise de variância circularidade

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,005055	3	0,001685	6,741752	0,000221	2,642851
Dentro dos grupos	0,058983	236	0,00025			
Total	0,064038	239				

Fonte: Autoria própria (2026)

A análise de comparações múltiplas pelo teste de Tukey apresentados na Tabela 14 indicou que o grupo A e B apresentaram médias de circularidade estatisticamente semelhantes entre si. Da mesma forma, não foi observada diferença estatisticamente significativa entre o grupo C e D. Por outro lado, o grupo A e B diferiram significativamente do grupo C e D, uma vez que as diferenças entre as médias foram superiores ao valor do DHS (0,0074). Esses resultados indicam que as ponteiras com geometria auto-centrante apresentaram melhor desempenho geométrico em relação à circularidade dos furos.

Tabela 14 - Teste Tukey circularidade

	PONTEIRA A	PONTEIRA B	PONTEIRA C	PONTEIRA D
PONTEIRA A		0,0005	0,0100	0,0076
PONTEIRA B			0,0104	0,0081
PONTEIRA C				0,0024
PONTEIRA D				

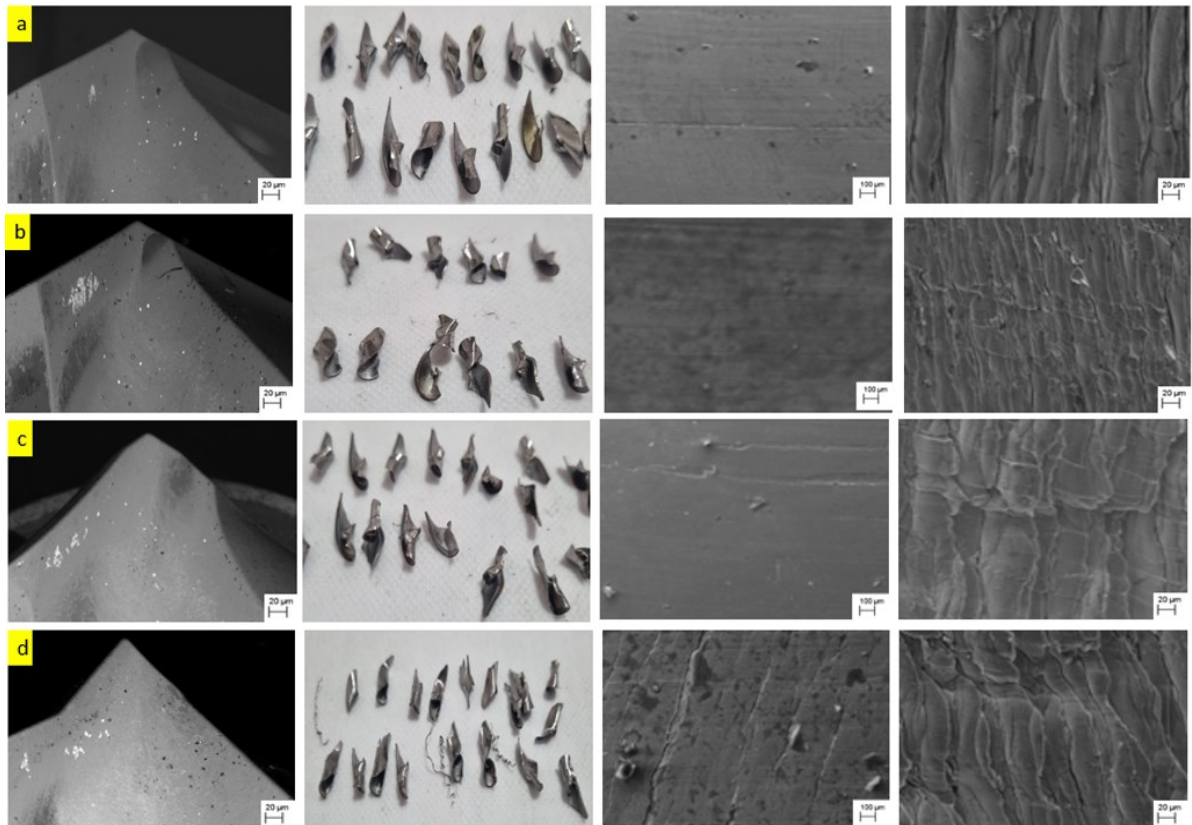
Fonte: Autoria própria (2026)

De modo geral, os resultados demonstram a formação de dois grupos estatisticamente distintos em relação à circularidade dos furos, evidenciando influência das diferentes ponteiras sobre o comportamento geométrico avaliado.

4.6 Análise dos cavacos

A Figura 62 apresenta as características geométricas das ponteiras e os respectivos cavacos gerados. A primeira coluna destaca a região da aresta de corte das ponteiras após o ensaio de furação. A segunda coluna mostra os cavacos gerados em cada condição experimental. A terceira e quarta colunas correspondem às imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), evidenciando a superfície dos cavacos em diferentes ampliações.

Figura 62 - Análise dos cavacos, Ponteira A (a); Ponteira B (b); Ponteira C (c); Ponteira D (d)



Fonte: Autoria própria (2026)

A análise individual dos tipos de cavacos apresentados na Figura 62 demonstrou que, independentemente do modelo de ponteira, bem como variações no material usinado, os cavacos apresentaram natureza predominantemente contínua, com variações no grau de fragmentação e na intensidade da deformação plástica.

Verificou-se que a forma dos cavacos foram predominantemente classificadas como leque (conforme Figura 10 do tópico 2.2.1 deste trabalho), caracterizada por geometrias curvadas e abertas, sendo observada de maneira consistente independentemente das variações nas geometrias das ponteiros (A, B, C e D) durante a usinagem do aço ASTM GR50.

A análise das superfícies dos cavacos por microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou diferenças nos mecanismos de deformação plástica em função das geometrias de ponteiros avaliadas.

Para as ponteiros A e B, observou-se uma morfologia superficial mais irregular e com deformações distribuídas de forma heterogênea. Esse comportamento está associado a um regime de corte menos estável, com variações locais no escoamento

do material, o que ajuda a explicar a maior dispersão observada nos parâmetros de rugosidade e qualidade geométrica.

Por outro lado, a ponteira C apresentou cavacos com aspecto significativamente mais uniforme. Esse resultado indica melhor controle das condições de corte, refletindo diretamente na qualidade superficial e na consistência dimensional dos furos produzidos.

No caso da ponteira D nota-se a ocorrência de irregularidades ao longo da superfície dos cavacos. Esse comportamento sugere um regime de corte relativamente estável, porém suscetível a perturbações. A presença da dupla margem tende a aumentar o contato lateral entre ferramenta e peça, elevando o atrito e dificultando o escoamento uniforme do material, o que contribui para essa instabilidade observada.

Cavacos com morfologia mais organizada indicam um escoamento plástico mais contínuo e controlado, enquanto superfícies irregulares estão associadas a variações no regime de corte. Esses comportamentos também estão em linha com os resultados obtidos para rugosidade, desgaste e circularidade.

Esses resultados estão de acordo com o que é reportado na literatura, na qual a morfologia do cavaco é apontada como um importante indicativo do regime de corte e da estabilidade do processo, sendo fortemente influenciada pela geometria da ferramenta e pelas condições de usinagem (Xu et al., 2017; Hu et al., 2026).

Dessa forma, conclui-se que, embora as propriedades do material favoreçam a formação de cavacos contínuos, a geometria da ferramenta exerce papel decisivo no comportamento do processo. De maneira geral, as ponteiras com dupla margem apresentaram maior propensão à instabilidade, em função do aumento do contato lateral e do atrito, resultando em cavacos mais irregulares e em desempenho inferior do ponto de vista superficial e geométrico. Nesse contexto, a ponteira C apresentou maior estabilidade no escoamento do material e melhor desempenho global entre as configurações avaliadas.

4.7 Síntese do desempenho das ponteiras

A partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, foi realizada uma análise geral do desempenho das ponteiras intercambiáveis avaliadas na furação do aço ASTM A572 GR50. Essa análise integrou os parâmetros de desgaste da ferramenta, comportamento dimensional dos furos, circularidade e rugosidade

superficial, permitindo avaliar a influência das características geométricas das ponteiras sobre a estabilidade e a qualidade do processo de usinagem.

A avaliação conjunta dos resultados possibilitou identificar o desempenho global de cada configuração, considerando o equilíbrio entre vida útil da ferramenta, precisão geométrica e integridade superficial dos furos. O Quadro 1 apresenta uma síntese comparativa dos principais resultados obtidos para as diferentes ponteiras analisadas.

Quadro 1 – Desempenho das ponteiras

Ponteiras	Desgaste	Rugosidade média Ra (µm)	Rugosidade média Rz (µm)	Variação do Diâmetro	Circularidade média	Cavacos	Classificação comparativa
Ponteira C	Menor desgaste observado (VB = 0,076 mm)	1,09	9,77	~40 µm	0,036 mm	Uniformes	1º
Ponteira A	Desgaste progressivo (VB = 0,086 mm)	1,27	11,66	~150 µm	0,046 mm	Irregulares	2º
Ponteira B	Lascamentos localizados (VB = 0,078 mm)	1,49	11,17	Moderada	0,047 mm	Irregulares	3º
Ponteira D	Maior degradação da aresta (VB = 0,077 mm)	1,73	17,10	>13,10 mm	0,038 mm	Instáveis	4º

Fonte: Autoria própria (2026)

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões deste estudo, fundamentadas nos resultados obtidos, e propõe direções para futuras pesquisas voltadas ao aprimoramento do processo de furação com ponteiros de alta produtividade.

5.1 Conclusões

Com base na análise dos quatro modelos de ponteiros intercambiáveis aplicados ao processo de furação do aço ASTM A572 Grau 50, aliada à metodologia empregada e à interpretação dos resultados obtidos, torna-se possível estabelecer as seguintes conclusões:

- A geometria da ponteira exerce influência direta no comportamento de desgaste, sendo que modelos com dupla margem apresentam maior severidade devido ao aumento da área de contato lateral, elevação do atrito e redução da eficiência de lubrificação. As ponteiros B e D apresentaram desgaste mais crítico, caracterizado por lascamento, degradação do revestimento e exposição do substrato. Em contrapartida, a ponteira C apresentou desgaste leve e maior estabilidade operacional, enquanto a ponteira A apresentou comportamento intermediário.
- A análise do desgaste de flanco (VB) evidenciou valores médios próximos entre as ponteiros, com comportamento semelhante dentro da variabilidade experimental. No entanto, o desgaste de flanco (VB) isoladamente não é suficiente para avaliar o desempenho da ferramenta, sendo essencial considerar as falhas como lascamento e ruptura.
- A geometria da ponteira influencia diretamente a qualidade superficial, sendo observado que modelos com dupla margem apresentaram tendência ao aumento da rugosidade. A ponteira D apresentou os maiores valores de rugosidade, com superfícies marcadas por picos e vales acentuados, enquanto a ponteira B apresentou comportamento intermediário. Em contrapartida, a ponteira C apresentou menores valores de rugosidade (R_a e R_z) e topografia mais homogênea, enquanto a ponteira A apresentou comportamento intermediário. A análise tridimensional corroborou os resultados bidimensionais, evidenciando a complementaridade das metodologias.

- Os resultados demonstraram que a geometria das ponteiras influenciou significativamente o diâmetro final dos furos. As ponteiras B e C apresentaram maior estabilidade dimensional e menor dispersão dos resultados, associadas à geometria auto-centrante e à dupla margem de guia. A ponteira A apresentou maior variação dimensional devido à menor estabilidade lateral da geometria convencional. Já a ponteira D apresentou maiores desvios em função da ruptura da quina da ferramenta durante o ensaio. A análise estatística confirmou diferenças significativas entre os grupos avaliados, evidenciando a influência da geometria das ponteiras na precisão dimensional dos furos.
- Os resultados de circularidade demonstraram influência significativa da geometria das ponteiras no comportamento geométrico dos furos. As ponteiras C e D apresentaram os menores valores médios de circularidade devido à maior capacidade de auto-centragem e estabilidade durante a furação. Já as ponteiras A e B apresentaram maiores valores médios, indicando maior sensibilidade a desvios geométricos. A análise estatística confirmou diferenças significativas entre os grupos avaliados.
- A morfologia dos cavacos mostrou forte relação com a estabilidade do processo e a geometria das ponteiras. A ponteira C apresentou cavacos mais uniformes, indicando corte estável. Nas ponteiras de dupla margem (B e D) há aumento do contato lateral e do atrito, que dificultam o escoamento uniforme do material. Como resultado, há formação de cavacos mais irregulares e maior variabilidade na qualidade geométrica.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- a) Investigar o comportamento de diferentes geometrias de ponteiras intercambiáveis no processo de furação profunda, considerando sua influência na estabilidade do processo e na variabilidade dos parâmetros dimensionais e geométricos dos furos.
- b) Avaliar as forças de corte atuantes no processo de furação para cada modelo de ponteira, avaliando parâmetros como força axial, força radial e torque;
- c) Realizar uma análise comparativa das temperaturas geradas durante o uso de cada modelo de ponteira, avaliando o impacto térmico nas condições de

usinagem e identificando possíveis variações relacionadas ao desempenho e à estabilidade térmica das ferramentas;

- d) Investigar a influência de diferentes condições de lubrificação, como usinagem a seco, aplicação de fluido em abundância e mínima quantidade de lubrificante (MQL), no desempenho de ponteiros intercambiáveis no processo de furação.

REFERÊNCIAS

- AKDULUMA, A.; KAYIR, Y. **Experimental comparison of indexable drilling with different U-drills on hole quality**. *Machining Science and Technology*, v. 27, n. 6, p. 1120-1138, 2023.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. 8. reimp. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- ABNT. **ABNT NBR ISO 4287:2002: especificações geométricas do produto (GPS) – rugosidade: método do perfil – termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ABNT. **ABNT NBR ISO 4288:2007: especificações geométricas de produtos (GPS) – rugosidade: método do perfil – regras e procedimentos para a avaliação de rugosidade de superfícies**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ABNT. **ABNT PB-286: brocas helicoidais de haste cilíndrica e cônica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1977.
- ASTAKHOV, V. P. **Fundamentals of metal cutting and machine tools**. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A572/A572M-15: standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel**. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- ASM INTERNATIONAL. **ASM handbook: machining**. v. 16. Materials Park: ASM International, 1990.
- BEZ, J. A. dos S.; CAVALER, L. C. de C.; MILANEZ, A. **Avaliação do desempenho de brocas de metal duro no processo de furação em aço AISI H13 temperado**. Criciúma: Centro Universitário UniSATC, 2022. Disponível em: <https://repositorio.satc.edu.br>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- BORBA, T. M. D. **Weldability evaluation of sincron EN 10025-4 S355M steel applied in wind tower manufacturing welding with high efficiency process**. *Soldagem e Inspeção*, v. 22, n. 4, p. 413-428, 2017.
- BORDIN, F. M. **Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.
- BORDINASSI, E. C.; ALMEIDA FILHO, C. O. C.; STIPKOVIC FILHO, M.; BATALHA, G. F. **Controle de rebarbação e das forças de corte em processos de furação com brocas helicoidais**. In: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 2003. Anais...** São Paulo: ABCM, 2003.
- BROWN, A.; SMITH, B.; JOHNSON, C. Advanced machining techniques. *Journal of Manufacturing Engineering*, v. 25, n. 2, p. 45-58, 2019.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.
- CAPELLO, E.; LANGELLA, A.; NELE, L.; PAOLETTI, A.; SANTO, L.; TAGLIAFERRI, V. Drilling polymeric matrix composites. In: DAVIM, J. P. **Machining: fundamentals and recent advances**. New York: Springer, 2008.

- CHEN, R. Diffusion wear in cutting tools. **Materials Science and Engineering**, v. 23, n. 4, p. 567-572, 2018.
- CHEN, X.; WANG, Q.; AN, Q.; CHEN, M.; GUO, H.; HE, Y. Research on drilling performance and tool life improvement methods of titanium alloy ultra-high-speed drilling bits. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 133, p. 417-431, 2024. DOI: 10.1007/s00170-024-13756-9.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: [s. n.], 1988.
- COCHRAN, W. G. **Experimental designs**. 2. ed. New York: Wiley, 1980.
- CZITROM, S. S. V.; MONTEIRO, S. N.; FERREIRA, J. A. M. Avaliação da rugosidade superficial em processos de usinagem: uma abordagem estatística. **Revista Matéria**, v. 20, n. 2, p. 456-467, 2015.
- DAVIM, J. P. **Machining of hard materials**. Cham: Springer, 2019.
- DE CASTRO, F. C. **Usinagem dos materiais metálicos**. São Paulo: EdUSP, 2001.
- DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.
- DENKANA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. **CIRP Annals: Manufacturing Technology**, v. 63, n. 2, p. 631-653, 2014.
- DIN. **DIN 1836. Spiralbohrer: Hauptabmessungen**. Berlin: Beuth Verlag, 1962.
- DIN. **DIN 6581. Begriffe der Zerspantechnik: Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges**. Berlin: Beuth Verlag, 1985. 42 p.
- DIN ISO 5419. **Spiralbohrer: Benennungen, Definitionen und Formen (ISO 5419:1982)**. Berlin: Beuth Verlag, 1998. 17 p.
- DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Artliber, 2008.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- DOLINŠEK, S. Work-hardening in the drilling of austenitic stainless steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 133, n. 1-2, p. 63-70, 2003. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00245-5.
- DZULFIKRI, Z.; HUANG, C. Analysis of tool wear mechanism and wear effect of drill thread mill machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2024.
- EHSAN, S. et al. **Evaluating tool wear mechanisms, hole integrity and drilling performance of indexable and solid carbide tools on GFRP-steel stacked composite**. *Wear*, v. 576-577, p. 206096, 2025.
- ERTUNC, H. M.; LOPARO, K. A. A decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in drilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 9, p. 1347-1362, 2001. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00111-5.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9. ed. São Paulo: Blücher, 1995.

FIELD, A.; MILES, J.; FIELD, Z. **Discovering statistics using IBM SPSS statistics**. 5. ed. London: Sage Publications, 2018.

FISHER, R. A. **Statistical methods for research workers**. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1925.

GOMES, A.; SILVA, R.; PEREIRA, M. Dry drilling of structural steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 35, p. 123-135, 2021.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing**. 6. ed. New Jersey: Wiley, 2019.

GUIBERT, N.; PARIS, H.; RECH, J.; CLAUDIN, C. Identification of thrust force models for vibratory drilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, p. 30-38, 2009. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.007.

HU, D.; ZHANG, Y.; CHEN, X.; LIU, Q. Simulation research on drilling characteristics of indexable insert drills in blind hole machining. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 79, p. 102-114, 2026.

ISCAR. **SUMOCHAM – HCP-IQ drilling heads**. Disponível em: <https://webshop.iscar.com.br/catalogue/product/1943357>. Acesso em: 09 maio 2026.

ISCAR. **New self-centering double margin SUMOCHAM insert**. Disponível em: <https://www.iscar.com/products.aspx/countryid/23/productid/10146>. Acesso em: 09 maio 2026.

JOHNSON, A.; KIM, H. **Wear mechanisms of interchangeable drill bits in high-speed machining**. *Wear*, v. 432, p. 345-355, 2020.

JONES, M. T.; GARCIA, P. Tool wear and adhesion in machining processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 35, n. 2, p. 123-130, 2017.

KE, F.; NI, J.; STEPHENSON, D. A. Continuous chip formation in drilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 15, p. 1652-1658, 2005. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.03.011.

KENNAMETAL. **Drill coatings for optimized performance**. 2023. Disponível em: <https://www.kennametal.com>. Acesso em: 25 jul. 2024.

KHAN, M. A. et al. Investigation of wear mechanism in drilling of PPA composites for automotive industry. **Journal of Engineering Research**, v. 11, 2023.

KHAN, M. A. et al. **Tool material selection for drilling operations: a review**. **Procedia Manufacturing**, v. 54, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322001234>. Acesso em: 25 jul. 2024.

KHAN, S. A. et al. Deep hole drilling of AISI 1045 via high-speed steel twist drills: evaluation of tool wear and hole quality. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, 2017.

KIM, J. H.; LEE, J. H. Advanced materials and technologies for high-speed steel cutting tools: a review. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 75, p. 350-368, 2022. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.06.001.

KLOCKE, F.; ARNTZ, K.; BRINKSMEIER, E. Advances in indexable insert drilling for structural steel machining. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 42, p. 55-63, 2023.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1: cutting**. Berlin: Springer, 2011.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 5. ed. Berlin: Springer, 1997.

KÜHN, H.; SCHMIDT, M.; WAGENKNECHT, C. Wear behavior of indexable insert drills in steel machining. **Procedia CIRP**, v. 96, p. 379-382, 2021.

KUMAR, V.; SINGH, R. Enhanced design and performance of high-speed steel drills for high-temperature applications. **Materials Science and Engineering: A**, v. 887, p. 144-156, 2024. DOI: 10.1016/j.msea.2023.144156.

KWONG, J.; AXINTE, D. A.; WITHERS, P. J.; HARDY, M. C. Minor cutting edge-workpiece interactions in drilling of an advanced nickel-based superalloy. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 49, p. 645-658, 2009.

LEE, H. S.; KIM, S. Y. Oxidation wear in drilling operations. **Surface and Coatings Technology**, v. 42, n. 5, p. 789-795, 2016.

LEE, H.; WANG, Q. Advanced wear-resistant materials for cutting tools. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 20, n. 3, p. 275-289, 2018.

LI, H.; LIU, Z.; CHEN, M. Tool wear mechanisms and tribological behavior in steel machining under different lubrication conditions. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 86, p. 45-58, 2023.

LI, L. et al. Machinability of high-strength low-alloy steels: a review. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 49, p. 1-15, 2020.

LIU, W.; ZHOU, Q.; LI, L.; WU, Z.; CAO, F.; GAO, Z. Effect of alloy element on corrosion behavior of the huge crude oil storage tank steel in seawater. **Journal of Alloys and Compounds**, p. 198-204, 2014.

LIU, X.; LIN, X.; JIA, X.; LI, Y.; SHAO, C. Influence of tool nose angle on cutting performance in hot machining of Inconel 718. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 71, 2024.

LÓPEZ DE LACALLE, L. N.; LAMIKIZ, A.; MUÑOA, J.; SALGADO, M. A. Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 38, n. 5-6, p. 499-507, 2008.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

MALEKAN, M.; MADSEN, K. L.; AIRAIO, J.; ILVIG, C. F.; AGHABABAEI, R. Numerical assessment of tool geometry for improving productivity in milling stainless steel 316L. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 136, p. 3451-3463, 2025.

MATIVENGA, P. T.; SCHOOP, J.; JAWAHIR, I. S.; BIERMANN, D.; KIPP, M.; ÖZEL, T. Engineered design of cutting tool material, geometry, and coating for optimal

performance and customized applications: a review. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 52, p. 212-228, 2024.

MITSUBISHI MATERIALS. **Catálogo de ferramentas**. 2013. Disponível em: https://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/drill_terminology_nomenclature.html. Acesso em: maio 2024.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 10. ed. New York: Wiley, 2020.

MORAIS, G. T. et al. **Análise da rugosidade superficial em polímeros submetidos ao processo de furação a seco em função de parâmetros e ferramentas de corte**. In: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL – CONEMI, 22., 2023, São Luís. Anais [...]**. São Luís: CONEMI, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/xxiiconemi/527265-analise-da-rugosidade-superficial-em-polimeros-submetidos-ao-processo-de-furacao-a-seco-em-funcao-de-parametros>. Acesso em: 24 jun. 2025.

OBERG, E. et al. **Machinery's handbook**. 30. ed. New York: Industrial Press, 2016.

POULACHON, G. et al. Machining of high-strength steels: influence of tool geometry and coating on performance. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 587-590, 2016.

RICHCONN. **Surface roughness explained: Ra, Rq, Rz, and more**. 2024. Disponível em: <https://richconn.com/surface-roughness/>. Acesso em: 18 maio 2026.

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

SANDVIK COROMANT. **Chip formation and chip breaking**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com>. Acesso em: 15 mar. 2026.

SANTANA, M. I.; POLLI, M. L. Effects of tool edge preparation on tool life in drilling of SAE4144M steel. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 23, n. 10, p. 1113-1122, 2022.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SIKANDER, A.; ULLAH, B.; NASEEM, M. S.; CHANNAR, H. R.; ASLAM, M. Analysis of dry and cryogenic drilling on hole quality in AA2024-T6 using HSS and HSS-Co tools. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences**, v. 37, art. 15, 2025. DOI: 10.1007/s44444-025-00018-6.

SMITH, J.; BROWN, T.; NGUYEN, P. Mechanical properties of ASTM A572 steel. **Materials Science and Engineering**, v. 45, n. 7, p. 987-995, 2019.

SMITH, J. A.; BROWN, L. B. Wear mechanisms in cutting tools. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 18, n. 3, p. 456-462, 2015.

SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. **Cutting tool edge preparation**. Technical Paper SME MR99-235, 1999.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 6. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 7. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2008.

THOMPSON, L. Environmental and economic aspects of dry machining. **Sustainable Manufacturing and Engineering**, v. 29, p. 77-89, 2018.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

TSCHÄTSCH, H. **Applied machining technology**. Berlin: Springer, 2009.

TUKEY, J. W. Comparing individual means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 5, n. 2, p. 99-114, 1949.

UÇAK, N.; ÇİÇEK, A. The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 31, p. 662-673, 2018. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.01.003.

WANG, F. J.; ZHAO, M.; FU, R.; LIU, X.; QIU, S.; YAN, J. B.; ZHANG, B. Y. Replaceable drill bit with compound step and sawtooth structures for damages and drilling-cost reduction of CFRP composite. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 81, p. 1018-1027, 2022.

XU, Y.; WAN, Z.; ZOU, P.; ZHANG, Q. **Estudo experimental sobre o formato do cavaco em torneamento assistido por vibração ultrassônica de aço inoxidável austenítico 304**. 2019.

ZHANG, Y.; LIU, H.; WANG, J. Performance evaluation of modular drill bits with replaceable inserts in high-speed steel drilling. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 74, p. 112-120, 2022.

ZHANG, Y. Q.; ZHANG, H. Q.; LIU, W. M.; HOU, H. Effects of Nb on microstructure and continuous cooling transformation of coarse grain heat-affected zone in 610 MPa class high-strength low-alloy structural steels. **Materials Science and Engineering A**, v. 499, n. 1, p. 182-186, 2008.

ZHANG, X.; WANG, Y. Recent advances in coated high-speed steel cutting tools: properties, performance, and applications. **Surface & Coatings Technology**, v. 461, p. 126978, 2023. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.126978.

ZHOU, X.; LI, Y.; WANG, H.; ZHANG, J. **Evaluating tool wear mechanisms and drilling performance of indexable and solid carbide drills in hybrid composite materials**. *Wear*, v. 532-533, p. 204859, 2025.

APÊNDICE A - Leitura desgaste de flanco

LEITURA DO DESGASTE DE FLANCO (VB) PARA CADA MODELO DE PONTEIRA