



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Felipe Ribeiro Frazão

**INFLUÊNCIA DO AVANÇO E DA PROFUNDIDADE NA VARIAÇÃO
DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA DE FUROS EM AÇO DE MÉDIO
CARBONO**

OURO PRETO - MG
2026

FELIPE RIBEIRO FRAZÃO
E-mail: felipe.frazao@aluno.ufop.edu.br

**INFLUÊNCIA DO AVANÇO E DA PROFUNDIDADE NA VARIAÇÃO
DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA DE FUROS EM AÇO DE MÉDIO
CARBONO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito para a
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: DSc. Diogo Antônio de Souza

OURO PRETO – MG
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F848i Frazao, Felipe Ribeiro.

Influência do avanço e da profundidade na variação dimensional e geométrica de furos em aço de médio carbono. [manuscrito] / Felipe Ribeiro Frazao. - 2026.

68 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antonio Sousa.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Usinagem. 2. Processos de fabricação - Máquinas de perfuração. 3. Tolerância (Engenharia) - Toleranciamento Dimensional e Geométrico (GD&T). I. Sousa, Diogo Antonio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Felipe Ribeiro Frazão

Influência do avanço e da profundidade na variação dimensional e geométrica de furos em aço de médio carbono

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em 16 de julho de 2026

Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/07/2026, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1148297** e o código CRC **5D19AE15**.

À Deus, dedico mais esta etapa vencida.

Aos meus pais, Everaldo e Maria Celia, pelo amor e apoio incondicional.

À minha avó, Elmita, por todo incentivo e apoio.

À Escola de Minas, pelo ensino gratuito e de qualidade.

À minha segunda casa, Republica Arca de Noé.

AGRADECIMENTO

A minha família, por sempre acreditar em mim e apoiar. Ao meu orientador, Prof. Dr. Diogo Antônio de Souza, pelo incentivo, paciência e orientação neste trabalho. Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, principalmente ao Prof. Dr. Igor Cezar Pereira, por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho. Aos irmãos republicanos, pela amizade e pelos momentos compartilhados.

*“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”*

Albert Einstein

RESUMO

A precisão dimensional de furos é essencial para a qualidade de componentes mecânicos. Este estudo investiga a influência das variáveis de processo na variação dimensional de furos em aço de médio carbono. A pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender os efeitos dos parâmetros de usinagem na qualidade dimensional, estabelecendo correlações entre os parâmetros de entrada e as características dimensionais e geométricas dos furos. A metodologia consistiu em ensaios experimentais em um centro de usinagem CNC, utilizando três brocas distintas, a broca 1, fabricada em aço rápido e sem revestimento, a broca 2 fabricada em metal duro e revestida com CrSi e a broca 3 fabricada em metal duro revestida com TiAlN. Os furos foram realizados em chapa de aço SAE 1040, variando-se o avanço. As peças foram medidas em uma máquina de medição por coordenadas tridimensional, avaliando-se o diâmetro, a circularidade e a excentricidade no comprimento total dos furos. Os dados foram analisados através do método estatístico de Análise de Variância de fator duplo com repetição. Os resultados demonstraram que o comportamento das ferramentas varia significativamente conforme o tipo de broca utilizado. Para as brocas 1 e 2, a profundidade foi o fator predominante, influenciando mais de noventa por cento da variação observada no diâmetro, circularidade e cilindridade dos furos, enquanto o avanço apresentou influência quase nula. A broca 3 apresentou comportamento diferente, onde todos os fatores foram estatisticamente significativos, com a interação contribuindo de trinta e sete a quarenta e dois por cento da variação total. Conclui-se que as brocas 1 e 2 possuem menos sensibilidade à alteração da velocidade de avanço, concentrando a degradação da dimensão e da geometria dos furos apenas nos efeitos do aprofundamento, enquanto a broca 3 é mais sensível à alteração da velocidade de avanço, apresentando instabilidades no processo, consequentemente uma maior variação dimensional e geométrica dos furos.

Palavras-chave: Usinagem. Furação. Variação Geométrica. Variação Dimensional.

ABSTRACT

The dimensional accuracy of holes is essential for the quality of mechanical components. This study investigates the influence of process variables on the dimensional variation of holes in medium-carbon steel. The research is justified by the need to understand the effects of machining parameters on dimensional quality, establishing correlations between input parameters and the dimensional and geometric characteristics of the holes. The methodology consisted of experimental trials in a CNC machining center, using three distinct drills: drill 1, made of high-speed steel and uncoated; drill 2, made of solid carbide and coated with CrSi; and drill 3, made of solid carbide coated with TiAlN. The holes were drilled in SAE 1040 steel plates, varying the feed rate. The parts were measured in a three-dimensional coordinate measuring machine, evaluating the diameter, roundness, and eccentricity along the entire length of the holes. The data were analyzed using the two-way Analysis of Variance (ANOVA) statistical method with replication. The results demonstrated that the behavior of the tools varies significantly according to the type of drill used. For drills 1 and 2, depth was the predominant factor, influencing more than ninety percent of the observed variation in the diameter, roundness, and cylindricity of the holes, while the feed rate showed almost zero influence. Drill 3 exhibited a different behavior, where all factors were statistically significant, with the interaction contributing thirty-seven to forty-two percent of the total variation. It is concluded that drills 1 and 2 are less sensitive to changes in feed rate, concentrating the degradation of the hole's dimension and geometry solely on the effects of depth, whereas drill 3 is more sensitive to changes in feed rate, presenting instabilities in the process and, consequently, a greater dimensional and geometric variation of the holes.

Key-words: Machining. Drilling. Geometric Variation. Dimensional Variation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partes de uma broca	8
Figura 2 - Geometria da cunha de corte de uma broca helicoidal	9
Figura 3 - Aplicação das forças de usinagem na broca	11
Figura 4 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	23
Figura 5 - Corpo de prova - Chapa de aço SAE 1040	24
Figura 6 - Vista geral da broca 1	24
Figura 7 - Vista da ponta da broca 1.....	25
Figura 8 - Vista da afiação da broca 1	25
Figura 9 - Vista geral da broca 2	26
Figura 10 - Vista da ponta da broca 2.....	26
Figura 11 - Vista da afiação da broca 2	27
Figura 12 - Vista geral da broca 3	27
Figura 13 - Vista da ponta da broca 3.....	28
Figura 14 - Vista da afiação da broca 3.....	28
Figura 15 - Centro de usinagem ROMI D600	29
Figura 16 - Fluido para usinagem Vasco 7000.....	29
Figura 17 - Equipamento de medição 3d - TESA MICRO-HITE 3D 474.....	30
Figura 18 - Sonda de toque com ponta de 3mm	30
Figura 19 - Amostra com os furos realizados.....	31
Figura 20 - Pontos de coleta de medidas	32
Figura 21 - Medidas realizadas nos furos	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Esforços nas partes da broca	12
Tabela 2- Elementos da Tabela ANOVA	19
Tabela 3 - Variáveis e Indicadores do Estudo	33
Tabela 4 - Tabela para coleta de medidas em laboratório	35
Tabela 5 - Medidas da broca 1 coletadas em laboratório	37
Tabela 6 - Análise de Variância (ANOVA) para o Diâmetro – Broca 1	37
Tabela 7 - Análise de Variância (ANOVA) para a Circularidade– Broca 1	38
Tabela 8 - Análise de Variância (ANOVA) para a Excentricidade – Broca 1	39
Tabela 9 - Medidas da broca 2 coletadas em laboratório	40
Tabela 10 - Análise de Variância (ANOVA) para o Diâmetro – Broca 2	40
Tabela 11 - Análise de Variância (ANOVA) para a Circularidade – Broca 2	41
Tabela 12 - Análise de Variância (ANOVA) para a Excentricidade – Broca 2	41
Tabela 13 - Medidas da broca 3 coletadas em laboratório	42
Tabela 14 - Análise de Variância (ANOVA) para a Diâmetro– Broca 3	43
Tabela 15 - Análise de Variância (ANOVA) para a Circularidade– Broca 3	44
Tabela 16 - Análise de Variância (ANOVA) para a Excentricidade– Broca 3	46
Tabela 17 - Contribuição percentual das variáveis n’o resultado da broca	48

LISTA DE SIMBOLOS

- α - Ângulo de incidência
- β - Ângulo de cunha
- γ - Ângulo de saída do cavaco
- ϵ - Ângulo de quina
- σ - Ângulo de ponta da broca
- Ψ - Ângulo do gume transversal da broca
- $r\epsilon$ - Raio de quina
- F_c - Força de corte
- F_a - Força de avanço
- F_p - Força passiva
- M_c - Momento torsor (torque)
- D - Diâmetro da broca
- f - Avanço (mm/volta)
- V_c - Velocidade de corte
- p - Profundidade de medição (mm)
- SQ - Soma dos Quadrados
- MQ - Média dos Quadrados
- gl - Graus de Liberdade
- F - Estatística F (razão F ou valor F)
- H_0 - Hipótese nula
- α - Nível de significância Estatística
- P - Valor-P (probabilidade de significância)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Usinagem.....	6
2.2	Furação	7
2.2.1	Esforços do processo de furação	11
2.2.2	Materiais das Brocas.....	12
2.2.3	Revestimentos das Brocas	13
2.2.4	Variáveis Importantes do Processo de Furação.....	14
2.2.5	Resultados do Processo de Furação.....	15
2.3	Geometria do Furo.....	15
2.3.1	Diâmetro do Furo	15
2.3.2	Circularidade do Furo	16
2.3.3	Excentricidade do Furo.....	16
2.4	Estatística.....	17
2.4.1	Métodos Estatísticos	17
2.4.2	Teste ANOVA	17
3	METODOLOGIA.....	20
3.1	Tipo de pesquisa	20
3.2	Materiais e métodos.....	23
3.2.1	Materiais	23
3.2.2	Método.....	30
3.3	Variáveis e Indicadores	32
3.4	Instrumento de coleta de dados	34
3.5	Tabulação de dados	35
3.6	Considerações finais	35

4	RESULTADOS	36
4.1	Análise dos resultados da broca 1.....	36
4.1.1	Análise estatística: Diâmetro do Furo - Broca 1	37
4.1.2	Análise estatística: Circularidade do Furo - Broca 1.....	38
4.1.3	Análise estatística: Excentricidade do Furo - Broca 1.....	38
4.1.4	Discussão dos Resultados - Broca 1	39
4.2	Análise dos resultados da broca 2.....	40
4.2.1	Análise estatística: Diâmetro do Furo - Broca 2	40
4.2.2	Análise estatística: Circularidade do Furo - Broca 2.....	41
4.2.3	Análise estatística: Excentricidade do Furo - Broca 2.....	41
4.2.4	Discussão dos Resultados - Broca 2	42
4.3	Análise dos resultados da broca 3.....	42
4.3.1	Análise estatística: Diâmetro do Furo - Broca 3	43
4.3.2	Análise estatística: Circularidade do Furo - Broca 3.....	44
4.3.3	Análise estatística: Excentricidade do Furo - Broca 3.....	45
4.3.4	Discussão dos resultados - broca 3	46
4.4	Discussão comparativa do desempenho das brocas	47
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	50
5.1	Conclusão	50
5.2	Recomendações	51
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Segundo Halevi (2003), a indústria de manufatura é fundamental para a economia global, sendo responsável pela produção de componentes mecânicos de alta precisão. Entre os diversos processos de usinagem utilizados na manufatura, para Tönshoff *et al.* (1994), a furação destaca-se como um dos mais comuns e essenciais, sendo responsável por aproximadamente 25% do tempo total de usinagem e 33% das operações realizadas nas indústrias.

O processo de furação é uma operação complexa que envolve a remoção de material através de uma ferramenta de corte rotativa que faz o corte através do avanço da broca sobre a peça a ser usinada. Apesar de sua aparente simplicidade, este processo apresenta diversos desafios, incluindo a geração de calor, a evacuação inadequada de cavacos e a manutenção da precisão dimensional. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Bordinassi *et al.* (2004) demonstra que a variação do avanço pode ser justificada pela mudança na quantidade de material a ser removida pela broca, o seu aumento faz com que os esforços de corte aumentem significativamente. Conforme observado por Carvalho *et al.* (2017), a força de avanço e o momento torsor são influenciados diretamente pelo avanço e pelo tipo de broca utilizada. Estes aumentos nos esforços de corte, afetam a precisão do processo de furação, uma vez que maiores esforços podem provocar desvios no trajeto da broca durante a penetração no material que comprometem a qualidade geométrica e dimensional dos furos.

Com as inúmeras opções de ferramentas e processos para a execução da furação, Halevi (2003) afirma que se deve levar em conta as especificações técnicas dos furos a serem executados, tais como, dureza do material, usinabilidade, profundidade e diâmetro do furo, acabamento superficial, precisão de localização, tolerância dimensional e geométrica e detalhes especiais (rebaixo, rosca, chanfros, etc.).

Conforme relatado por Diniz *et al.* (2013), para furos profundos, existe uma dificuldade na extração do cavaco, lubrificação e refrigeração, associada a vibração do processo, essas condições acabam reduzindo a qualidade do furo usinado resultando em furos ovalizados, acabamento superficial grosseiro e tolerâncias muito largas. Desta forma, o

aumento da profundidade do furo intensifica os desafios do processo de furação, comprometendo a precisão dimensional e geométrica do furo.

A tolerância geométrica e dimensional de um furo é importante para o correto funcionamento da peça a ser produzida, segundo Sultan, Sharif e Kurniawan (2015) o avanço e a velocidade de corte são parâmetros determinantes para se obter um furo de qualidade, sendo assim a variação desses parâmetros pode resultar na variação dimensional do furo obtido, comprometendo o correto funcionamento da peça produzida.

Conforme demonstrado por Bordinassi *et al.* (2004) devido à complexidade do processo de furação e da multiplicidade de variáveis, uma investigação experimental, permite investigar sistematicamente as relações entre os parâmetros de usinagem e a qualidade dos furos, buscando validar empiricamente os conhecimentos teóricos já consolidados na literatura.

Tendo em vista as dificuldades do processo de furação, sua importância para a indústria manufatureira, e as variáveis que envolve o processo, o trabalho tem como objetivo responder a seguinte pergunta problema.

Como o avanço e a profundidade influenciam a variação dimensional e geométrica de furos em aço de médio carbono?

1.2 Justificativa

O processo de furação é uma das operações de usinagem mais comuns e fundamentais na manufatura moderna, apesar de sua aparente simplicidade, a furação é uma operação complexa que envolve múltiplos fatores que influenciam a qualidade final do produto. A compreensão profunda desses fatores é essencial para otimizar os parâmetros de corte, selecionar ferramentas adequadas e desenvolver estratégias eficazes de controle de qualidade como afirma (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

A qualidade de um furo é determinada primariamente por suas características dimensionais e geométricas, particularmente o diâmetro, a circularidade e a excentricidade. Conforme demonstrado por Pop *et al.* (2024), a precisão dimensional de furos é de extrema importância no contexto da tecnologia de manufatura rápida e precisa, dado seu papel essencial na montagem e funcionalidade das peças acabadas. As características dimensionais

e geométricas dos furos são diretamente afetadas pelas variáveis inerentes do processo de furação, incluindo velocidade de corte, avanço e profundidade de furação.

A pesquisa de Pop *et al.* (2024) demonstrou através de análise estatística ANOVA que existe uma correlação significativa entre os parâmetros de corte e as dimensões dos furos em diversos materiais. Este achado reforça a necessidade de estudos detalhados que correlacionem as variáveis de processo com a variação dimensional obtida, a fim de otimizar a qualidade dos furos produzidos.

A importância do processo de furação é particularmente crítica em indústrias com elevados requisitos de qualidade e segurança. Na indústria aeroespacial, um único avião comercial de fuselagem única contém aproximadamente 3 milhões de furos, dos quais aproximadamente 750.000 são furados manualmente de acordo com (Atlas Copco, 2023).

A precisão desses furos é crítica para a funcionalidade e montagem dos componentes estruturais da aeronave. Conforme relatado por Atlas Copco (2023), aproximadamente 50% dos furos superdimensionados podem ser evitados se o operador receber o treinamento adequado e tiver acesso às ferramentas corretas.

Apesar da importância crítica da furação, o processo enfrenta diversos desafios que afetam a precisão e a integridade do furo. Segundo Tönshoff *et al.* (1994), os principais desafios incluem desgaste da broca, geração de altas temperaturas, evacuação insuficiente de cavacos, desvio da ferramenta e parâmetros de processo. Estes problemas podem comprometer significativamente a precisão dimensional e as características geométricas dos furos produzidos.

A variação nos parâmetros de corte, como velocidade de corte, avanço e profundidade de furação, desempenha um papel crucial na qualidade final do furo. De acordo com a Pop *et al.* (2024), a seleção cuidadosa dos parâmetros de corte é crucial para alcançar altos padrões de precisão e repetibilidade no processamento de materiais. Diferentes materiais apresentam comportamentos distintos durante a furação, exigindo otimização específica dos parâmetros para cada aplicação.

A velocidade de corte influencia significativamente o desgaste da ferramenta e a qualidade superficial do furo. Velocidades excessivamente altas podem resultar em desgaste acelerado e geração excessiva de calor, enquanto velocidades muito baixas podem resultar em deformação plástica do material e furos com acabamento inadequado. O avanço, por sua vez, afeta as forças de corte, o desgaste da ferramenta e a precisão dimensional do furo. A

profundidade de furação é particularmente importante, pois furos profundos apresentam desafios adicionais em termos de demandas sobre a máquina e a ferramenta como apresenta (HALEVI, 2003).

Ao obter uma compreensão mais profunda dos efeitos das variáveis de processo na variação dimensional de furos, torna-se possível otimizar os parâmetros de corte para cada aplicação específica. Esta otimização pode resultar em múltiplos benefícios, incluindo: seleção de ferramentas mais adequadas para cada condição de corte; desenvolvimento de estratégias eficazes de controle de qualidade; redução de retrabalho e sucata; aumento da produtividade e eficiência do processo; e garantia da confiabilidade e segurança das peças produzidas.

Diante do exposto, este trabalho se justifica pela necessidade de investigar experimentalmente como o avanço e a profundidade do furo influenciam a variação dimensional e geométrica de furos em aço de médio carbono. O aço de médio carbono é amplamente utilizado em aplicações industriais, particularmente na indústria automotiva e de construção, tornando a otimização do processo de furação neste material de grande relevância prática.

A realização de experimentos controlados em laboratório permitirá correlacionar os parâmetros de entrada do processo com as características dimensionais e geométricas dos furos obtidos. Os resultados deste estudo contribuirão para o entendimento das relações entre os parâmetros de corte e a qualidade do furo realizado, fornecendo recomendações práticas para otimização do processo em ambiente industrial.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar a influência do avanço e da profundidade de furação sobre a variação dimensional e geométrica de furos em aço de médio carbono.

1.3.2 Específicos

Apresentar uma revisão da literatura sobre os conceitos fundamentais, abordando os processos de usinagem com ênfase no processo de furação, conceitos de metrologia aplicada a

furos e metodologia estatística de Análise de Variância (ANOVA) como ferramenta para análise dos dados experimentais.

Descrever a abordagem metodológica, especificando os procedimentos experimentais realizados em laboratório.

Investigar experimentalmente os efeitos do avanço e da profundidade na variação dimensional de furos em aço de médio carbono, através de experimentos controlados em laboratório utilizando uma máquina CNC com parâmetros de corte pré-estabelecidos.

Aplicar métodos estatísticos apropriados para determinar a significância da influência de cada variável de processo sobre as características dimensionais e geométricas dos furos, identificando quais parâmetros exercem maior impacto na variação dimensional observada.

Correlacionar as variáveis de entrada do processo com os resultados obtidos na variação dimensional dos furos, estabelecendo relações quantitativas que permitam prever o comportamento do processo sob diferentes condições de corte.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos, dos quais no primeiro há uma apresentação do problema de variação dimensional em furos fundamentando a pergunta problema sobre a influência do avanço e da profundidade na qualidade geométrica dos furos.

No segundo capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos de usinagem, furação, ferramentas de corte, metrologia dimensional e metodologia estatística que serão aprofundados em uma base teórica para argumentação deste trabalho.

O terceiro capítulo apresentará uma descrição detalhada sobre a metodologia utilizada para a pesquisa, especificando os materiais, equipamentos, parâmetros de corte e procedimentos experimentais para a obtenção dos dados e resultados.

No quarto capítulo é apresentada a análise dos resultados dos experimentos realizados em laboratório e suas respectivas avaliações em relação ao diâmetro, circularidade e excentricidade dos furos observados através da metodologia ANOVA.

O capítulo 5, demonstra como este estudo ajudará a entender as relações entre os parâmetros de corte e a qualidade dimensional e geométrica dos furos bem como apresenta recomendações para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre os principais conceitos que fundamentam este trabalho. Inicia-se com uma abordagem geral sobre os processos de usinagem, focando em seguida no processo de furação, suas ferramentas, variáveis e os desafios associados à qualidade geométrica dos furos. Por fim, são introduzidos os conceitos de metrologia dimensional aplicada a furos e a metodologia estatística de Análise de Variância (ANOVA), utilizada para a análise dos dados experimentais obtidos.

2.1 Usinagem

A usinagem é definida pela norma ABNT NBR 6175:2015 Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) como um processo mecânico de fabricação que visa dar forma, acabamento ou dimensões a uma peça através da remoção de material na forma de cavaco. Este processo é caracterizado pelo uso de uma ferramenta de corte, que possui uma geometria específica e dureza superior à do material da peça, para remover o sobremetal de forma controlada (FERRARESI, 2018).

Segundo Machado *et al.* (2015), a usinagem é o processo de fabricação mais utilizado no mundo, sendo responsável por transformar cerca de 10% de toda a produção de metais em cavacos. Sua importância reside na capacidade de produzir peças com geometrias complexas, tolerâncias dimensionais apertadas e acabamentos superficiais de alta qualidade, características que outros processos de fabricação, como fundição e forjamento, não conseguem alcançar diretamente.

Os processos de usinagem são classificados com base no tipo de ferramenta e nos movimentos relativos entre a ferramenta e a peça. De acordo com Ferraresi (2018), os principais processos convencionais incluem o torneamento, onde a peça gira em torno de seu eixo enquanto a ferramenta se move linearmente, gerando superfícies de revolução; o fresamento, no qual a ferramenta, dotada de múltiplas arestas de corte, gira enquanto a peça se move, permitindo a criação de superfícies planas, rasgos, canais e contornos complexos; a furação, onde a ferramenta (broca) gira e penetra na peça, gerando um furo cilíndrico; e a retificação, que utiliza uma ferramenta abrasiva (rebolo) girando em alta velocidade para

remover pequenas quantidades de material, conferindo à peça um acabamento superficial de alta qualidade e precisão dimensional.

2.2 Furação

A norma ABNT NBR 6175:2015 Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015, p. 2) define furação como "Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante."

A furação é um dos processos de usinagem mais comuns e essenciais na indústria de manufatura, sendo utilizada para criar furos que podem servir para montagem, passagem de parafusos, alívio de peso, alojamento de rolamentos, entre outras finalidades. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999), a vasta aplicação do processo se deve ao fato de que a maioria dos componentes mecânicos requer ao menos um furo, e raramente estes são obtidos diretamente nos processos de conformação inicial da peça, como fundição ou forjamento. De acordo com Tönshoff *et al.* (1994), o processo de furação corresponde a aproximadamente 25% do tempo total de usinagem e a 33% das operações realizadas na indústria.

Apesar de sua aparente simplicidade, a furação é um processo complexo que ocorre em um ambiente confinado, o que impõe desafios significativos. Tönshoff *et al.* (1994) destacam que as condições desfavoráveis incluem a dificuldade de se acompanhar o processo de geração de cavaco, o espaço limitado para a remoção do cavaco pelas estrias da broca, o atrito considerável entre a peça, a ferramenta e o cavaco, o fluxo de calor insatisfatório das superfícies, a variação da velocidade de corte ao longo da aresta (sendo zero no eixo de rotação e máxima na extremidade) e a dificuldade de atuação de fluidos refrigerantes e lubrificantes na zona de corte.

De acordo com Ferraresi (2018, p. 24), a furação é dividida nas seguintes operações:

- Furação em cheio: Processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça, removendo todo material compreendido no volume do furo final na forma de cavaco. No caso de furos de grande profundidade há necessidade de ferramenta especial.
- Escareamento: Processo de furação destinado a abertura de um furo cilíndrico numa peça pré-furada.
- Furação escalonada: Processo de furação destinado a obtenção de um furo com dois ou mais diâmetros simultaneamente.
- Furação de centros: Processo de furação destinado a obtenção de furo de centro visando uma operação posterior na peça.
- Trepanação: Processo de furação em que apenas uma parte de material compreendido no volume do furo final é reduzida a cavaco, permanecendo com um núcleo maciço.

A ferramenta predominante no processo de furação é a broca helicoidal (*twist drill*). Sua geometria foi desenvolvida para permitir o corte do material e, simultaneamente, evacuar o cavaco gerado através de seus canais helicoidais como apresentado por Diniz, Marcondes e Coppini (1999). A broca helicoidal é dividida em várias partes como mostrado na figura 1

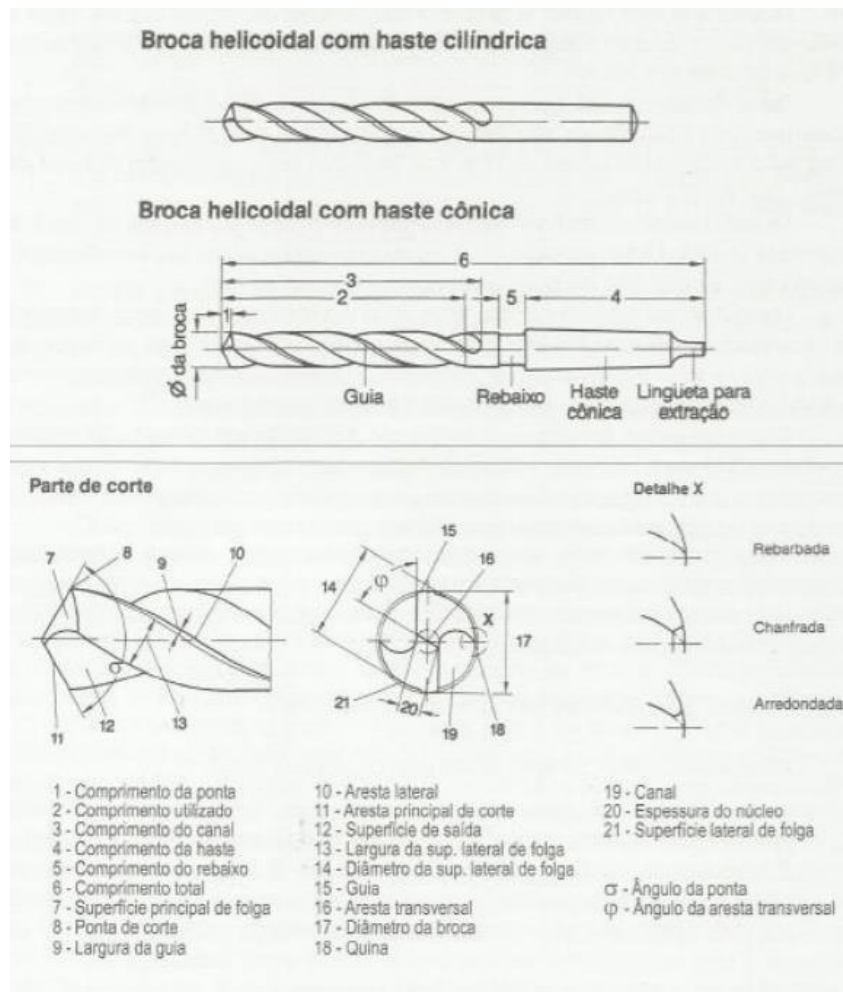


Figura 1 – Partes de uma broca
Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999)

A figura 1 mostra as partes de uma broca e é descrita por Diniz, Marcondes e Coppini (1999, p. 178) como:

- **Haste:** Destina-se à fixação da broca na máquina. Em brocas de diâmetro pequeno (até 15 mm) em geral usa-se brocas de haste cilíndrica e a fixação à máquina se dá por intermédio de mandris. Em brocas de diâmetros maiores, prefere-se prender a broca a um cone morse, que por sua vez é preso à máquina, o que possibilita maior força de fixação.

- **Diâmetro (D):** É medido entre as duas guias da broca. Normalmente tem tolerância dimensional h8.

- Núcleo: Parte interior da broca de diâmetro igual a $0,16 D$. Serve para conferir rigidez à broca.

- Guias: A superfície externa de uma broca helicoidal apresenta duas regiões (uma em cada aresta de corte) que tem diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca. Tais regiões são denominadas guias. Tem duas funções básicas - a primeira, como o próprio nome diz, é a de guiar a broca dentro do furo; a segunda é a de evitar que toda a parede externa da broca atrite com as paredes do furo, diminuindo assim os esforços necessários para a furação.

- Canais helicoidais: São as superfícies de saída da ferramenta. O ângulo de hélice de brocas normais, que na periferia da broca coincide com o ângulo de saída, pode ser 28 graus para brocas de aplicação geral (brocas do tipo N com ângulo de ponta = 118), 15 graus para brocas destinadas à usinagem de materiais com cavacos curtos (brocas tipo H com ângulo de ponta igual a 60 ou 90°) e 40 graus para brocas destinadas à usinagem de materiais com cavacos longos e/ou materiais moles (broca tipo W com ângulo de ponta de com cerca de 140°). O comprimento do canal helicoidal também pode variar dependendo do diâmetro da broca e do comprimento do furo que se deseja usinar. Além dessas brocas normais, existem uma infinidade de outros tipos de brocas helicoidais, tais como as destinadas a furos profundos, brocas extra-curtas quando se deseja maior rigidez da broca, brocas escalonadas para usinagem de furos passantes escalonados, brocas de calibração para calibrar ou alargar furos fundidos, pré-estampados ou pré-furados, etc.

- Arestas de corte: Numa broca helicoidal as duas arestas principais de corte não se encontram em um ponto, mas existe uma terceira aresta ligando-as. Esta terceira aresta é chamada de aresta transversal de corte. O ângulo formado entre as duas arestas principais, chamado de ângulo de ponta (s) (esta denominação não está de acordo com a norma brasileiro NBR 6163 que chama de ângulo de ponta o encontro entre a aresta principal e secundária de corte) é normalmente igual a 118 graus. Em brocas para usinagem de materiais moles seu valor é de 140 graus.

A figura 2 Apresenta a geometria da cunha cortante de uma broca conforme (CASTILLO, 2005).

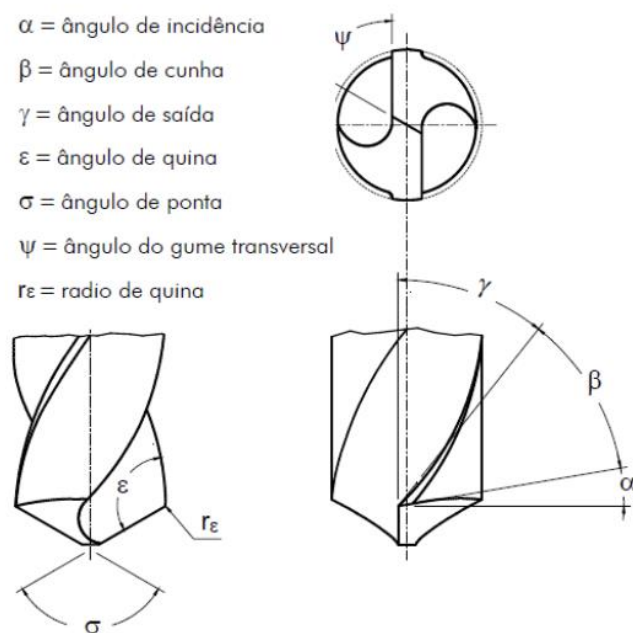


Figura 2 - Geometria da cunha de corte de uma broca helicoidal
Fonte: (CASTILLO, 2005)

De acordo com Castillo (2005) as arestas principais estão no sentido do avanço, dessa forma a aresta transversal se torna uma parte integrante da aresta principal de corte, devido ao ângulo de saída negativo, assim a aresta transversal não apresenta corte, e sim uma deformação plástica do material, extrudando o material até a parte cortante da aresta principal.

Ainda conforme Castillo (2005, p. 25-27) cada parte da geometria da ferramenta possui uma função e influencia diretamente no seu desempenho, sendo elas:

- O ângulo de ponta σ :

- Diminui a espessura do cavaco e aumenta o comprimento atuante do gume.
- Com o aumento do ângulo de ponta consequentemente aumenta o ângulo de quina ϵ elevando sua resistência mecânica e a dissipação do calor;
- É responsável pelas forças passivas que ajudam a eliminar eventuais vibrações.
- Influi na direção da saída do cavaco.

Com o aumento do ângulo de ponta da broca, a espessura do cavaco, para um mesmo avanço f , diminui. O emprego de um ângulo de ponta menor faz com que o cavaco seja mais fino e mais largo. Para o caso de alguns materiais de difícil usinabilidade, o cavaco mais grosso é mais vantajoso, pelo fato de fazer contato na face, num ponto mais afastado do gume. Um grande ângulo de ponta permite, usualmente, o aumento do avanço. Isto possibilita uma substancial redução no tempo de usinagem. Com o aumento do ângulo de ponta a centragem da ferramenta e o momento torçor tendem a diminuir

- Ângulo de incidência α : Tem como função principal evitar o atrito entre a superfície de corte e o flanco da ferramenta e permitir que o gume penetre no material e o corte livremente. Se o ângulo de incidência é muito pequeno, o gume não pode penetrar convenientemente no material e a ferramenta cega rapidamente. Assim, ocorre forte atrito com a peça, superaquecimento da ferramenta e mau acabamento superficial. Se o ângulo de incidência é demasiadamente grande, o gume quebra ou pode sofrer pequenos lascamentos em virtude do apoio deficiente. A grandeza do ângulo de incidência depende principalmente dos seguintes fatores:

- Resistência do material da ferramenta.
- Resistência e dureza do material da peça a ser usinada.

Usualmente, se o material da ferramenta apresenta alta tenacidade, pode-se usar ângulos de incidência grandes, sem perigo de quebras. Assim, podem ser usados ângulos maiores em ferramentas de aço rápido do que em ferramentas de metal-duro, devido à maior resistência e tenacidade do aço. Já a usinagem de materiais moles como o alumínio, permite usar ângulos bem maiores do que a usinagem de materiais duros como o aço.

- Ângulo de saída do cavaco γ : É o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência, medido no plano de medida da cunha cortante. Maiores avanços provocam cortes mais pesados, exigindo menores ângulos de saída. Quanto menor o avanço, maior pode ser o ângulo de saída. Para avanços muito pequenos, normalmente ocorre o contrário, pelas seguintes razões:

- Com avanços pequenos, a zona de pressão se situa muito próxima ao gume, fazendo com que este sofra maior aquecimento e desgaste.
- Ângulos de saída pequenos resultam num melhor acabamento.

Ângulos de saída negativos são empregados em ferramentas de metal-duro no corte de materiais de difícil usinabilidade e em cortes interrompidos, como no fresamento. O principal objetivo do ângulo de saída negativo é fazer com que a sollicitação da ferramenta, perto do gume, seja quase que exclusivamente de compressão. As desvantagens do ângulo de saída negativo são: menor qualidade da superfície usinada, necessidade de maior força e potência de usinagem e maior calor gerado na ferramenta.

2.2.1 Esforços do processo de furação

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999, p. 183), o processo de furação possui três tipos de resistências a penetração.

- Resistência devido ao corte do material nas duas arestas principais de corte.
- Resistência devido ao corte e esmagamento do material na aresta transversal de corte.
- Resistência devido ao atrito das guias com a parede do furo e entre a superfície de saída da broca e o cavaco.

Uma das principais características desse processo é a atuação simultânea de esforços de torção, decorrentes da rotação da broca, e de forças de compressão, resultantes do avanço da ferramenta na peça como apresentado na figura 3, esses esforços são aplicados sobre as partes da peça seguindo a seguinte proporção como apresentado por (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999) na tabela 1.

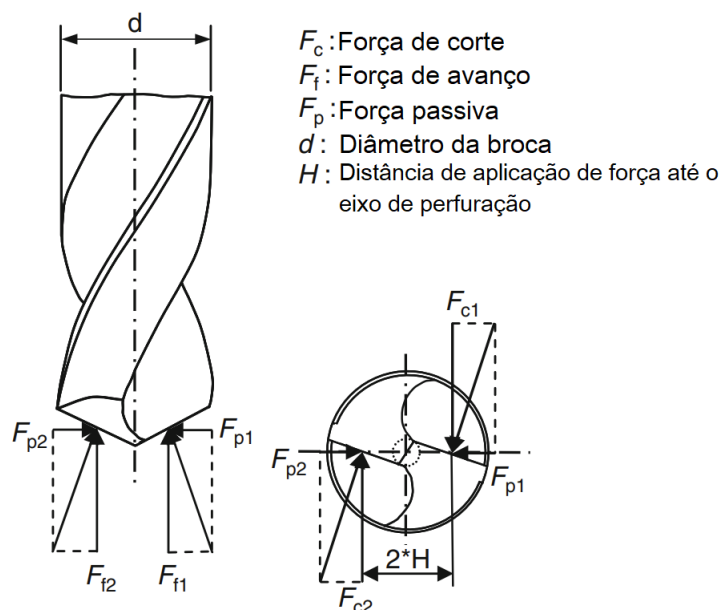


Figura 3 - Aplicação das forças de usinagem na broca
 Fonte: Adaptado de: (KLOCKE, 2011)

Tabela 1 - Esforços nas partes da broca

Forças	Arestas Principais	Aresta Transversal	Atritos
Momento Torsor	77% - 90%	3% - 10%	3% - 13%
Força de avanço	39% - 59%	40% - 58%	2% - 5%

Fonte: Adaptado de: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999)

Conforme apresentado na tabela, Diniz, Marcondes e Coppini (1999) ressalta a grande participação da aresta transversal de corte na força de avanço, que pode se dar por baixa rotação da broca e ângulo de saída negativo na região central da broca, baixos valores e até mesmo valores negativos do ângulo efetivo de folga nesta região, esmagamento do cavaco e encruamento do fundo do furo, na tentativa de reduzir esse efeito uma alternativa é fazer um pré furo e ou realizar um chanframento na aresta transversal.

Além disso, a geometria da broca, especialmente a presença da aresta transversal de corte, influencia significativamente as condições de corte, podendo causar aumento das forças de avanço e contribuições negativas para o desempenho da ferramenta. Outro ponto relevante é a evacuação dos cavacos gerados durante a operação, que, se não ocorrer de forma eficiente, pode provocar o entupimento do furo, aumento do momento torsor e até a quebra da broca.

2.2.2 Materiais das Brocas

A performance de uma broca é diretamente influenciada pelo material com que é fabricada. A seleção do material da ferramenta deve considerar a dureza e a usinabilidade do material da peça, a velocidade de corte desejada, o volume de produção e o custo. Os dois materiais mais relevantes para este estudo são:

Aço Rápido (HSS - *High-Speed Steel*): É uma liga de aço-ferramenta contendo elementos como tungstênio (W), molibdênio (Mo), cromo (Cr), vanádio (V) e, em alguns casos, cobalto (Co). O HSS possui alta tenacidade, o que o torna resistente a impactos e vibrações, e boa resistência ao desgaste em temperaturas moderadas, cerca de 600°C. Brocas de HSS, como a Broca 1 utilizada neste trabalho, são economicamente vantajosas e adequadas para uma vasta gama de aplicações em materiais de baixa a média dureza. Sua principal limitação é a perda de dureza em temperaturas elevadas, o que restringe as velocidades de corte aplicáveis conforme apresentado por Diniz, Marcondes e Coppini (1999).

Metal Duro (MD - *Cemented Carbide*): É um material compósito produzido por metalurgia do pó, consistindo em partículas duras de carboneto de tungstênio (WC) aglutinadas por um metal ligante, geralmente cobalto (Co). Brocas de metal duro, como as Brocas 2 e 3 utilizadas neste trabalho, possuem dureza a quente e resistência ao desgaste muito superiores às do HSS, mantendo suas propriedades em temperaturas de até 1000°C. Isso permite velocidades de corte de 3 a 5 vezes maiores que as utilizadas com HSS. São ideais para a usinagem de materiais de alta dureza e para produção em larga escala, embora sejam mais frágeis e de custo mais elevado de acordo com Ferraresi (2018).

2.2.3 Revestimentos das Brocas

Para melhorar ainda mais o desempenho das ferramentas de corte, brocas de metal duro e, em alguns casos, de HSS são frequentemente revestidas com camadas cerâmicas finas e duras, aplicadas por processos de Deposição Física de Vapor (PVD) ou Deposição Química de Vapor (CVD). Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999), os revestimentos têm como principais objetivos aumentar a dureza superficial e a resistência ao desgaste abrasivo, reduzir o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, e atuar como uma barreira térmica, protegendo o substrato da ferramenta das altas temperaturas geradas no corte.

Os revestimentos utilizados nas ferramentas deste trabalho são:

Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN): Utilizado na Broca 3 (OSG), é um revestimento de alto desempenho que representa uma evolução em relação ao TiN. A adição de alumínio à matriz de nitreto de titânio melhora significativamente a dureza a quente e a resistência à oxidação. Em altas temperaturas (acima de 600°C), o alumínio na camada de revestimento oxida e forma uma camada superficial passiva e termicamente estável de óxido de alumínio (Al₂O₃), que protege o substrato da ferramenta. Isso permite que o revestimento TiAlN seja eficaz em temperaturas de até 800-900°C, tornando-o ideal para usinagem em alta velocidade e a seco. Possui uma dureza na faixa de 2800-3200 HV e uma coloração característica que varia do violeta ao preto (MACHADO *et al.*, 2015).

O revestimento EgiAS pertence a uma família mais moderna de revestimentos nanocompostos, é um revestimento PVD (*Physical Vapor Deposition*) proprietário da OSG baseado em cromo e silício (CrSi) e projetado para aplicações de furação. Comparado ao revestimento TiAlN, apresenta maior resistência à oxidação em altas temperaturas (aproximadamente 1100 °C), maior tenacidade e melhor resistência à propagação de trincas,

proporcionando aumento da vida útil da ferramenta em operações severas de usinagem (OSG Corporation, 2025).

2.2.4 Variáveis Importantes do Processo de Furação

Os resultados do processo de furação são diretamente influenciados pelos parâmetros de corte selecionados pelo operador ou programador CNC. A escolha adequada desses parâmetros é fundamental para garantir a qualidade do furo, a vida útil da ferramenta e a produtividade do processo. As principais variáveis são:

Velocidade de Corte (vc): É a velocidade tangencial na periferia da broca, expressa em metros por minuto (m/min). É calculada pela fórmula $vc = \pi \times D \times n / 1000$, onde D é o diâmetro da broca (mm) e n é a rotação (rpm). A velocidade de corte tem um impacto direto na temperatura da zona de corte, no desgaste da ferramenta e no acabamento superficial. Velocidades excessivas geram calor excessivo, acelerando o desgaste e podendo causar deformações térmicas na peça. Velocidades muito baixas podem gerar aresta postiça de corte (APC), prejudicando o acabamento de acordo com (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Avanço (f): É a distância que a broca penetra na peça a cada rotação, expresso em milímetros por rotação (mm/rot). O avanço influencia diretamente a espessura do cavaco, as forças de corte e o tempo de usinagem. Um avanço elevado aumenta a produtividade, mas também eleva as forças de corte, podendo causar vibrações, deterioração do acabamento superficial e aumento da deflexão da ferramenta. Um avanço muito baixo pode causar encruamento da superfície e desgaste prematuro da aresta de corte (SULTAN; SHARIF; KURNIAWAN, 2015).

Profundidade de Furação: Refere-se à profundidade total do furo em relação à superfície da peça. À medida que a broca penetra mais fundo, a evacuação de cavacos e a refrigeração da zona de corte tornam-se progressivamente mais difíceis. A broca, comportando-se como uma viga em balanço, torna-se mais suscetível a deflexões laterais e vibrações, o que pode comprometer significativamente a precisão dimensional e geométrica do furo. Biermann *et al.* (2018) destacam que a relação comprimento/diâmetro é um parâmetro crítico: furos com $L/D > 5$ são considerados profundos e requerem estratégias especiais de usinagem.

2.2.5 Resultados do Processo de Furação

A qualidade de um furo é avaliada por um conjunto de características dimensionais e geométricas que determinam sua adequação funcional. Segundo Albertazzi e Sousa (2018), a conformidade de uma peça é verificada quando todos os seus elementos geométricos estão dentro das tolerâncias estabelecidas pelo projeto. A otimização do processo de furação visa minimizar os desvios em relação aos valores nominais especificados, garantindo que os furos atendam aos requisitos de qualidade.

Os principais resultados analisados neste trabalho são as características geométricas do furo, diâmetro, circularidade e excentricidade, que serão detalhadas na seção seguinte. Essas características são influenciadas por uma complexa interação entre os parâmetros de corte velocidade de corte, avanço e profundidade e as propriedades do material da peça, a geometria e o estado de conservação da ferramenta, e as condições de rigidez da máquina-ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

2.3 Geometria do Furo

A metrologia dimensional é a ciência da medição de comprimentos, ângulos e outras grandezas geométricas. No contexto da furação, a análise se concentra nos desvios entre a geometria real do furo e sua forma teórica ideal, um cilindro perfeito, com diâmetro exato, seção transversal perfeitamente circular e eixo perfeitamente posicionado. Segundo Albertazzi e Sousa (2018), esses desvios são classificados como erros macrogeométricos, e sua magnitude é determinada pela interação entre as variáveis do processo de usinagem. A norma NBR 6405:1998 Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988) estabelece os termos e conceitos para a análise e avaliação do estado das superfícies, enquanto a norma NBR6158:1995 Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) define o sistema de tolerâncias e ajustes que classifica a qualidade dimensional das peças.

2.3.1 Diâmetro do Furo

O diâmetro é a principal dimensão funcional de um furo e determina sua capacidade de alojar eixos, pinos, parafusos ou outros componentes. Em um furo ideal, o diâmetro seria constante ao longo de toda a profundidade e exatamente igual ao diâmetro nominal da broca. Na prática, porém, o diâmetro real pode variar ao longo da profundidade e pode ser maior (sobremedida) ou menor que o diâmetro nominal da broca.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999), os principais fatores que causam variação no diâmetro do furo incluem o desgaste progressivo das guias da broca, que tende a reduzir o diâmetro ao longo do tempo; a deflexão radial da ferramenta, que pode gerar furos com diâmetro variável ao longo da profundidade; as vibrações do sistema máquina-ferramenta-peça, que podem causar oscilações no diâmetro; e os efeitos térmicos, como a expansão da peça durante o corte e sua subsequente contração ao resfriar. A tolerância dimensional do furo (e.g., H7, H8) define o intervalo aceitável para essa variação, conforme o sistema ISO de tolerâncias e ajustes NBR6158:1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

2.3.2 Circularidade do Furo

A circularidade, é uma tolerância geométrica de forma que mede o quão próxima uma seção transversal do furo está de um círculo matemático perfeito. Segundo Albertazzi e Sousa (2018), a circularidade é definida como a diferença entre os raios de dois círculos concêntricos (o menor círculo circunscrito e o maior círculo inscrito) que contêm o perfil real da seção transversal. Um valor de circularidade igual a zero indicaria um círculo perfeito; quanto maior o valor, maior a distorção da forma.

Furos com baixa circularidade podem ser causados por diversos fatores, como vibrações autoexcitadas (*chatter*), que imprimem um padrão lobular na seção do furo; geometria de afiação irregular ou assimétrica da broca, que gera forças radiais desbalanceadas; deflexão da ferramenta sob a ação das forças de corte; e rigidez insuficiente da fixação da peça ou da máquina-ferramenta. A circularidade é particularmente importante em aplicações onde o furo deve alojar um eixo com ajuste preciso, como em mancais e guias lineares (BRONIS; MIKO; NOZDRZYKOWSKI, 2023).

2.3.3 Excentricidade do Furo

A excentricidade é uma medida do desvio de localização do eixo central do furo em relação à sua posição teórica (programada). Em outras palavras, avalia se o furo foi executado no lugar correto. Diferentemente do diâmetro e da circularidade, que são características intrínsecas do furo, a excentricidade relaciona o furo com um referencial externo — a posição nominal definida no projeto.

A excentricidade pode ser causada por uma má centralização inicial da broca na superfície da peça, especialmente quando não se utiliza furo de centro prévio; pela deflexão

lateral da ferramenta durante a penetração, que desvia progressivamente o eixo do furo de sua trajetória ideal; pelo desalinhamento entre o eixo do fuso da máquina e a superfície da peça; e por vibrações que induzem movimentos laterais na ferramenta. Biermann *et al.* (2018) destacam que a excentricidade tende a aumentar com a profundidade de furação, pois a broca, ao se aprofundar, comporta-se como uma viga em balanço com comprimento crescente, tornando-se cada vez mais suscetível a deflexões laterais.

2.4 Estatística

Para analisar quantitativamente a influência das variáveis de processo nos resultados geométricos, é necessário o uso de ferramentas estatísticas que permitam distinguir os efeitos reais dos fatores controlados da variabilidade aleatória inerente ao processo.

2.4.1 Métodos Estatísticos

A estatística oferece um conjunto de métodos para coletar, organizar, analisar, interpretar e apresentar dados de forma objetiva e quantitativa. No contexto da engenharia e da pesquisa experimental, o Planejamento de Experimentos (DoE - *Design of Experiments*) é uma abordagem estruturada e sistemática para determinar a relação entre os fatores que afetam um processo e os resultados deste processo. Segundo Montgomery (2013), o objetivo do DoE é extrair a máxima quantidade de informação com o mínimo de ensaios experimentais, permitindo identificar quais fatores são significativos, estimar a magnitude de seus efeitos e detectar possíveis interações entre eles.

Entre os métodos estatísticos mais utilizados na análise de dados experimentais em engenharia, destacam-se a estatística descritiva (média, variância, desvio padrão), os testes de hipóteses (teste t, teste F), a regressão linear e múltipla, e a Análise de Variância (ANOVA). A escolha do método depende do tipo de dados, do número de fatores e níveis investigados e dos objetivos da análise. Para experimentos com dois ou mais fatores e múltiplos níveis, como o presente trabalho, a ANOVA é a ferramenta mais adequada (TRIOLA, 2017).

2.4.2 Teste ANOVA

A Análise de Variância (ANOVA) é uma das técnicas estatísticas mais poderosas e amplamente utilizadas para analisar dados experimentais. Desenvolvida por Ronald Fisher na década de 1920, a ANOVA permite comparar as médias de dois ou mais grupos para

determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre eles (MONTGOMERY, 2013).

O princípio fundamental da ANOVA consiste em decompor a variação total dos dados em componentes atribuíveis a diferentes fontes:

- Variação entre os grupos (ou tratamentos): É a variação causada pelos diferentes níveis dos fatores controlados no experimento. No caso deste trabalho, os fatores são o avanço (com dois níveis: 0,2 e 0,4 mm/volta) e a profundidade de furação (com três níveis: 5, 10 e 15 mm).

- Variação dentro dos grupos (ou erro experimental): É a variação aleatória e não explicada, inerente ao processo de medição, às imperfeições do material e a outras fontes de ruído não controladas. Representa a variabilidade natural do processo.

A ANOVA calcula a razão entre essas duas variações através da estatística F (também chamada de razão F ou valor F). Se a variação causada pelos fatores for significativamente maior que a variação aleatória (erro), o valor F será grande, indicando que o fator tem um efeito real sobre a variável de resposta. A decisão estatística é tomada comparando o valor-P (probabilidade de se obter um resultado tão extremo quanto o observado, assumindo que o fator não tem efeito) com um nível de significância (α), geralmente fixado em 0,05 (5%). Se o valor-P for menor que α , rejeita-se a hipótese nula (H_0 : o fator não tem efeito) e conclui-se que o fator é estatisticamente significativo (FIELD, 2018).

Neste trabalho, foi utilizada a ANOVA de fator duplo com repetição (*Two-Way ANOVA with Replication*), que é uma extensão da ANOVA simples e permite avaliar simultaneamente:

- O efeito principal do Fator A (avanço): se a mudança no avanço causa uma variação significativa na resposta.

- O efeito principal do Fator B (profundidade): se a mudança na profundidade causa uma variação significativa na resposta.

- O efeito da interação $A \times B$: se o efeito combinado dos dois fatores é diferente da soma de seus efeitos individuais.

A detecção de uma interação significativa +é particularmente importante, pois indica que os fatores não atuam de forma independente. Conforme explicado por Montgomery (2013), quando a interação é significativa, a interpretação dos efeitos principais isoladamente

pode ser enganosa, pois o efeito real de um fator depende do nível do outro. Em termos práticos, uma interação significativa entre avanço e profundidade significaria que o impacto do avanço na qualidade do furo muda conforme a profundidade em que a medição é feita, e vice-versa.

A tabela ANOVA apresenta os seguintes elementos para cada fonte de variação:

Tabela 2- Elementos da Tabela ANOVA

Elemento	Descrição
SQ (Soma dos Quadrados)	Mede a variação total atribuída a cada fonte
gl (Graus de Liberdade)	Número de valores independentes na estimativa
MQ (Média dos Quadrados)	SQ dividida pelos graus de liberdade (SQ/gl)
F (Estatística F)	Razão entre MQ do fator e MQ do erro
valor-P	Probabilidade de significância
F crítico	Valor de referência da distribuição F para $\alpha = 0,05$

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Ao utilizar o teste de variância ANOVA, é comum que se utilize posteriormente o teste de Tukey, porém para esse trabalho não foi realizado, pois o objetivo da análise estatística não era realizar múltiplas comparações entre os pares de médias de todas as possíveis combinações de fatores, mas sim compreender a magnitude relativa da influência de cada fator isolado e de sua interação sobre a variabilidade total dos dados. A Análise de Variância (ANOVA), demonstrou-se suficiente para atingir o objetivo proposto, uma vez que permitiu identificar a significância estatística de cada variável e quantificar a sua contribuição percentual para a variação dimensional e geométrica observada.

3 METODOLOGIA

Segundo Gil (2002), metodologia é um conjunto de procedimentos e técnicas que são utilizados para realizar uma pesquisa, dessa forma ela se faz importante pois orienta os procedimentos a serem adotados para a obtenção de observações empíricas e a identificação das relações entre os fenômenos estudados.

Nesse capítulo será abordada a metodologia utilizada para realização dos experimentos de furação convencional nos corpos de prova, afim de verificar as variações dimensionais obtidas com a alteração dos parâmetros de corte aplicados a máquina ferramenta, aplicando inspeções dimensionais ao fim do processo de furação, e analisado os dados obtidos, correlacionando os parâmetros de entrada com os resultados das furações.

3.1 Tipo de pesquisa

A escolha adequada do tipo de pesquisa é fundamental para o sucesso de qualquer investigação científica. Segundo Gil (2002), a pesquisa pode ser classificada de diferentes formas, dependendo dos critérios utilizados para sua categorização. Neste trabalho, foram utilizados múltiplos tipos de pesquisa, cada um contribuindo de forma específica para o alcance dos objetivos propostos. A seguir, apresenta-se uma descrição detalhada de cada tipo de pesquisa empregado neste estudo.

A pesquisa bibliográfica constitui o primeiro tipo de pesquisa utilizado neste trabalho. De acordo com Marconi e Lakatos (2010), a pesquisa bibliográfica tem como finalidade colocar o pesquisador em contato direto com todo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto, permitindo o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, chegando a conclusões inovadoras. Esta abordagem foi essencial para fundamentar teoricamente o trabalho, permitindo a revisão crítica da literatura disponível sobre o processo de furação, ferramentas de corte, metrologia e geometria de furos.

A pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho incluiu a análise de livros, artigos científicos, dissertações e teses relacionadas ao processo de furação, variáveis de processo, precisão dimensional, características geométricas de furos e métodos estatísticos para análise de dados experimentais. Esta etapa foi crucial para identificar as lacunas no conhecimento

existente e justificar a necessidade do presente estudo, bem como para estabelecer as bases teóricas necessárias para a interpretação dos resultados experimentais obtidos.

O segundo tipo de pesquisa utilizado foi a pesquisa exploratória. Conforme (GIL, 2002), a pesquisa exploratória é um tipo de pesquisa que tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito ou constituindo hipóteses. Gil (2002) destaca 18 que o planejamento da pesquisa exploratória é bastante flexível, permitindo a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado.

A pesquisa exploratória foi empregada neste trabalho para proporcionar uma compreensão mais profunda do problema de variação dimensional em furos de aço de médio carbono. Esta abordagem permitiu explorar as relações entre as variáveis de processo e as características dimensionais e geométricas dos furos, bem como identificar os fatores que influenciam a precisão dimensional. A flexibilidade característica da pesquisa exploratória permitiu a consideração de diversos aspectos do processo de furação, incluindo o comportamento da ferramenta, as características do material, as condições de corte e os efeitos térmicos e mecânicos envolvidos na operação.

O terceiro tipo de pesquisa utilizado foi a pesquisa quantitativa. Segundo Marconi e Lakatos (2010), a pesquisa quantitativa é um dos tipos de pesquisa de campo que consiste em investigações empíricas cuja finalidade principal é o delineamento ou análise das características de fatos ou fenômenos, a avaliação de programas, ou o isolamento de variáveis principais ou chave. A pesquisa quantitativa permite a coleta e análise de dados numéricos, facilitando a identificação de padrões e relações entre variáveis.

Freitas (2013) destaca que a pesquisa quantitativa é empregada em vários tipos de pesquisas, inclusive nas descritivas, principalmente quando buscam a relação causa-efeito entre os fenômenos, pela facilidade de poder descrever a complexidade de determinada hipótese ou problema e analisar a interação de certas variáveis. No contexto deste trabalho, a pesquisa quantitativa foi utilizada como abordagem principal para analisar numericamente os efeitos das variáveis de processo sobre a variação dimensional dos furos. Esta abordagem permitiu a coleta de dados precisos sobre diâmetro, circularidade e excentricidade dos furos, bem como a análise estatística desses dados para determinar a significância da influência de cada variável de processo sobre as características dimensionais e geométricas dos furos obtidos.

O quarto tipo de pesquisa utilizado foi a pesquisa experimental. Para Freitas (2013), a pesquisa experimental é um tipo de pesquisa em que o pesquisador determina um objeto de estudo, seleciona as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, define as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Na pesquisa experimental, o pesquisador procura refazer as condições de um fato a ser estudado para observá-lo sob controle, utilizando um local apropriado, aparelhos e instrumentos de precisão para demonstrar o modo ou as causas pelas quais um fato é produzido, proporcionando o estudo de suas causas e seus efeitos.

A pesquisa experimental foi a abordagem central deste trabalho, permitindo a investigação controlada dos efeitos das variáveis de processo sobre a variação dimensional de furos. Nesta etapa, foram realizados experimentos em laboratório utilizando um centro de usinagem CNC, no qual foram furados corpos de prova de aço SAE 1040 sob diferentes condições de corte. Os furos foram então medidos utilizando instrumentos de precisão, permitindo a coleta de dados precisos sobre as características dimensionais e geométricas dos furos. O controle rigoroso das 19 variáveis de processo e das condições experimentais permitiu a identificação clara das relações de causa-efeito entre os parâmetros de corte e a variação dimensional observada.

Este trabalho utiliza uma abordagem metodológica que combina múltiplos tipos de pesquisa, cada um contribuindo de forma específica para o alcance dos objetivos propostos. A pesquisa bibliográfica foi realizada afim de obter o conhecimento já produzido sobre o processo de furação, ferramentas de corte, metrologia e geometria de furos. A pesquisa exploratória foi utilizada para proporcionar maior familiaridade com o problema de variação dimensional em furos, tornando-o mais explícito e constituindo hipóteses sobre os fatores que influenciam a precisão dimensional. A pesquisa quantitativa foi empregada como abordagem principal, consistindo em investigações empíricas cuja finalidade é a determinação e análise das características das variáveis envolvidas, bem como a avaliação da relação de causa-efeito entre os parâmetros de corte e as variações dimensionais obtidas. Finalmente, a pesquisa experimental foi conduzida através de experimentos controlados em laboratório, nos quais foi determinado o objeto de estudo, selecionado as variáveis independentes que seriam capazes de influenciá-lo, e definiu as formas de controle e observação dos efeitos dessas variáveis sobre as características dimensionais e geométricas dos furos, utilizando instrumentos padronizados de furação e medição para realizar o levantamento de dados confiáveis. A integração desses quatro tipos de pesquisa permitiu uma análise direta da relação entre as

variáveis do processo de furação e as variações dimensionais obtidas, associando os dados experimentais coletados com a literatura disponível sobre o assunto.

3.2 Materiais e métodos

Para a realização da pesquisa foi criado um fluxograma com as etapas do trabalho, como mostrado na figura 4.

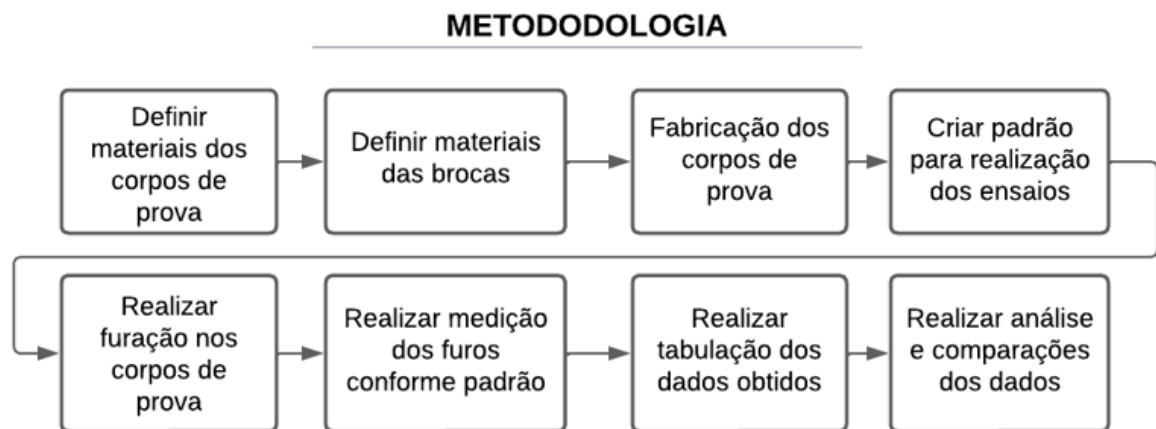


Figura 4 - Fluxograma das etapas do trabalho
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Figura 4 apresenta um passo a passo seguido para a realização da pesquisa apresentada.

3.2.1 Materiais

Para a realização da pesquisa foi utilizado os seguintes materiais.

- Corpo de prova O corpo de prova definido foi uma chapa de aço SAE 1040 com 500x500mm e espessura de 20mm conforme figura 5.



Figura 5 - Corpo de prova - Chapa de aço SAE 1040
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

- Brocas

Foram utilizadas três Brocas diferentes para realizar os furos. As brocas se diferenciam por seu material de fabricação e seu revestimento, sendo as seguintes.

– A broca 1 é uma broca da marca IRWIN de aço rápido (HSS) com diâmetro de 12mm e afiação cônica convencional, conforme apresentado nas figuras 6, 7 e 8.



Figura 6 - Vista geral da broca 1
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

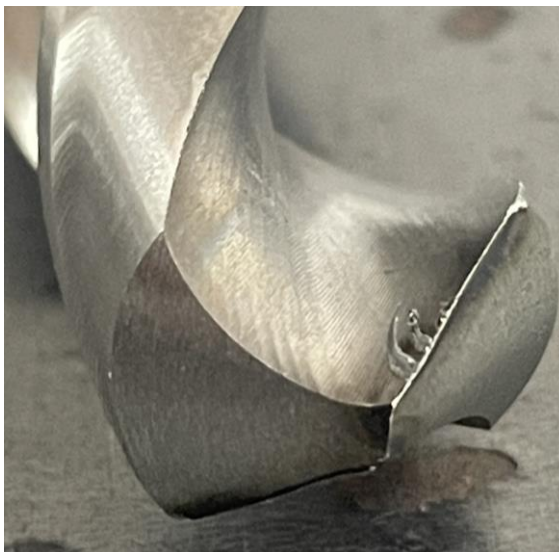


Figura 7 - Vista da ponta da broca 1
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

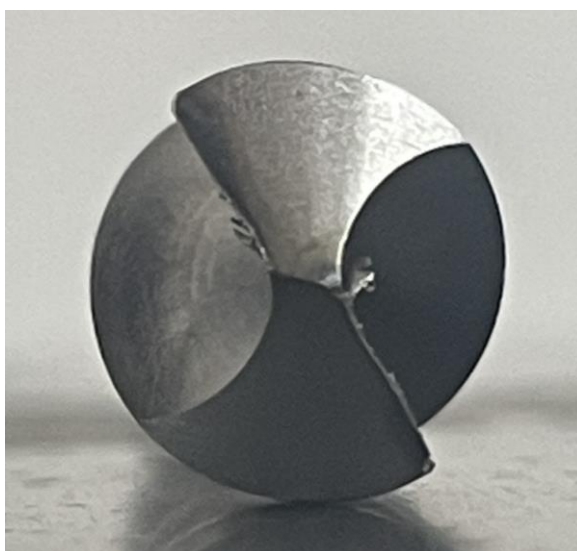


Figura 8 - Vista da afiação da broca 1
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

– A broca 2 é uma broca da marca OSG de Metal Duro (MD) com revestimento a base de Cromo (Cr) e Silício (Si) com diâmetro de 12mm e afiação cônica tipo *split point*, conforme apresentado nas figuras 9, 10 e 11.



Figura 9 - Vista geral da broca 2
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

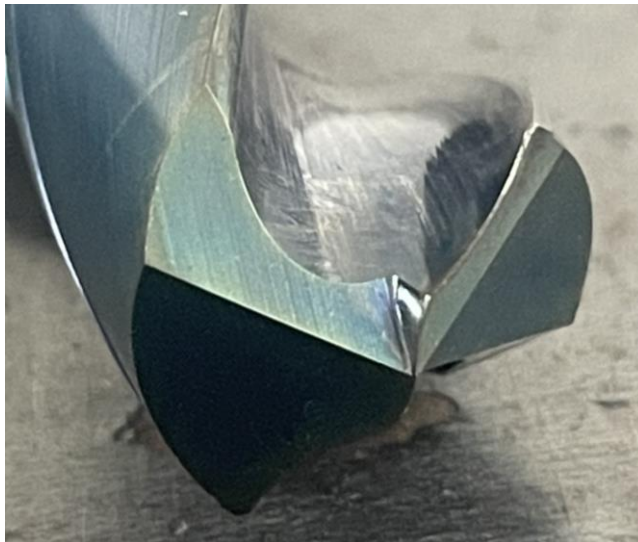


Figura 10 - Vista da ponta da broca 2
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

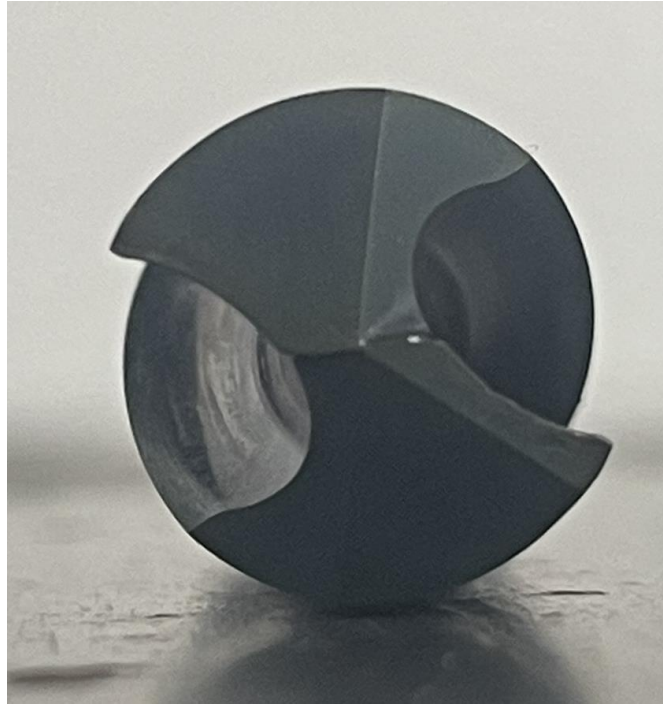


Figura 11 - Vista da afiação da broca 2
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

– A broca 3 é uma broca da marca OSG de Metal Duro (MD) com revestimento de Nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) diâmetro de 12mm e afiação cônica tipo split point, conforme apresentado nas figuras 12, 13 e 14



Figura 12 - Vista geral da broca 3
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

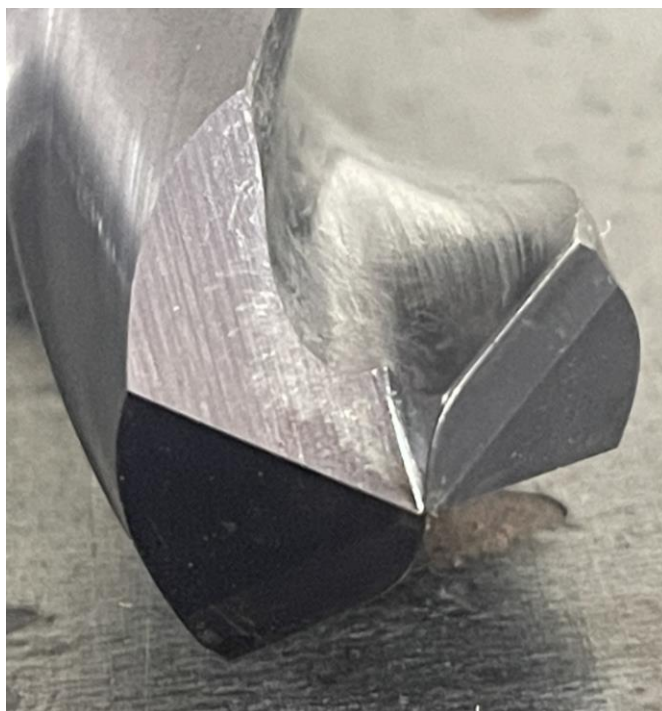


Figura 13 - Vista da ponta da broca 3
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

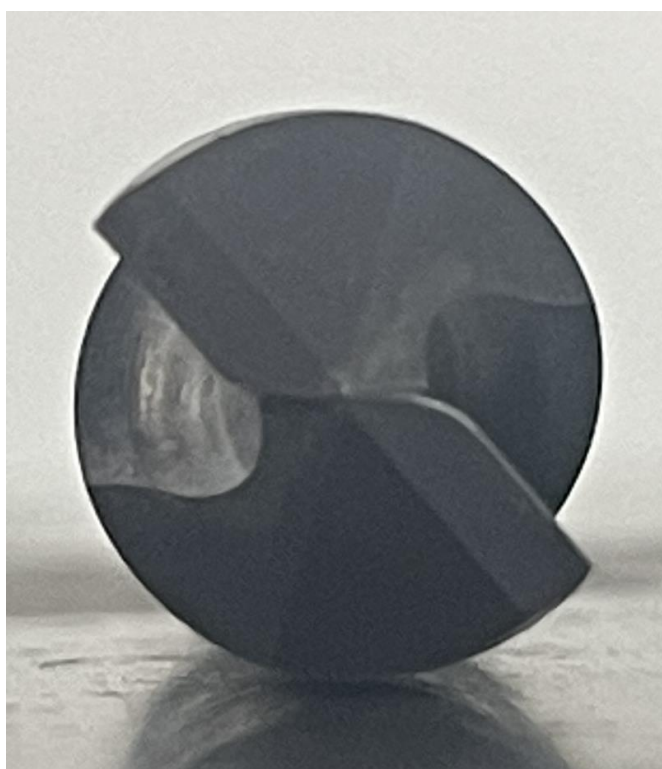


Figura 14 - Vista da afiação da broca 3
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

- Centro de Usinagem: Para realizar a furação foi utilizado um centro de usinagem ROMI D600, como apresentado na figura 15



Figura 15 - Centro de usinagem ROMI D600
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

- Fluido para usinagem: Para realizar os furos foi utilizado o fluido para usinagem Vasco 7000 que é um fluido de corte de alto desempenho, miscível em água, cuja base é um éster vegetal como mostrado na figura 16 com diluição de 6% em água.



Figura 16 - Fluido para usinagem Vasco 7000
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

- Equipamento de medição: Para realizar a medição dos furos realizados foi utilizado um equipamento de medição com coordenadas 3D, TESA MICRO-HITE 3D 474 como mostrado na figura 17



Figura 17 - Equipamento de medição 3d - TESA MICRO-HITE 3D 474
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

- Sonda de medição: Para realizar a medição foi utilizada uma sonda com ponta de 3mm de diâmetro conforme mostrado na figura 18



Figura 18 - Sonda de toque com ponta de 3mm
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

3.2.2 Método

Para o desenvolvimento da pesquisa foram feitos seis furos com cada uma das brocas, mantendo a velocidade de corte de 796 rpm e variando o avanço, para cada broca foram feitos

25 três furos com o avanço de 0,2mm/volta e outros três furos com o avanço de 0,4mm/volta, como mostrado na figura 19.

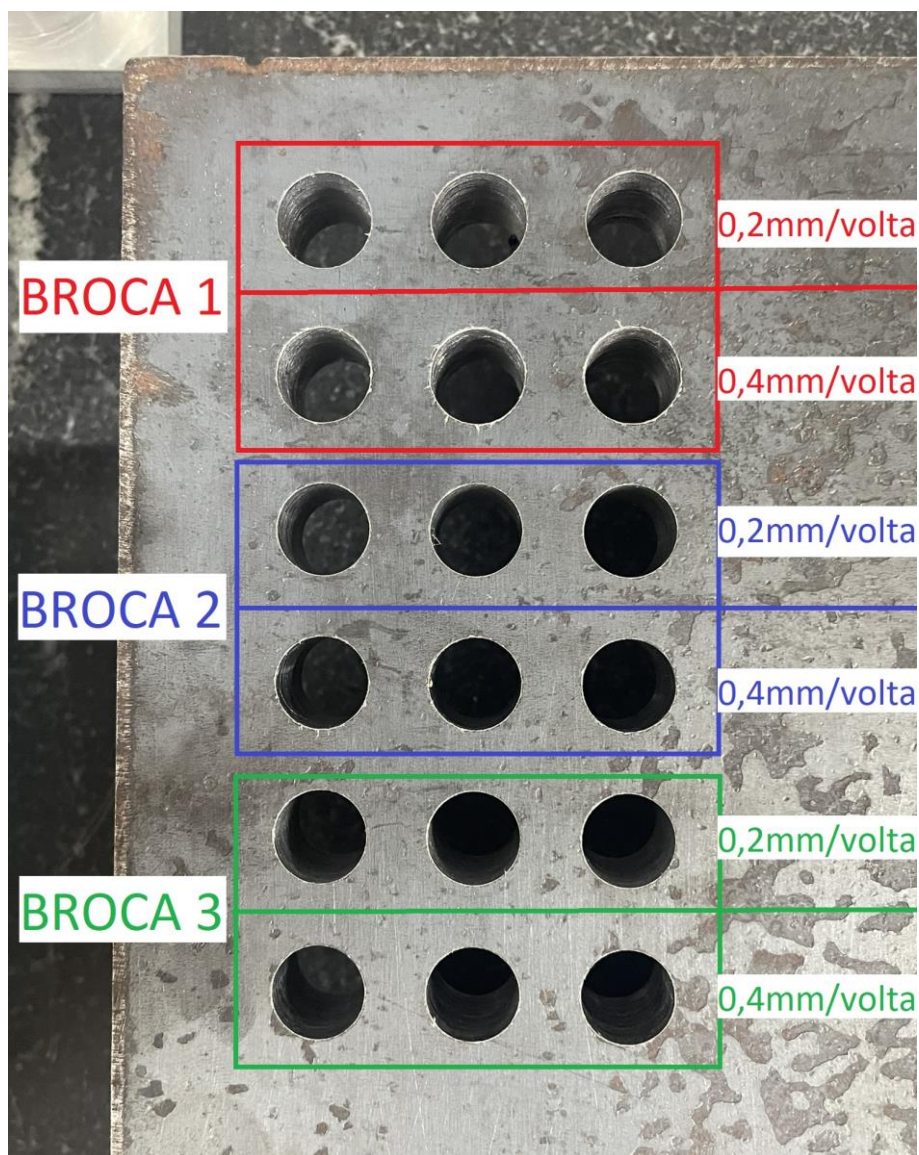


Figura 19 - Amostra com os furos realizados
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Para a determinação do diâmetro e da circularidade dos furos, adotou-se um procedimento padronizado de medição no qual foram coletados cinco pontos ao longo da circunferência, conforme ilustrado na figura 20

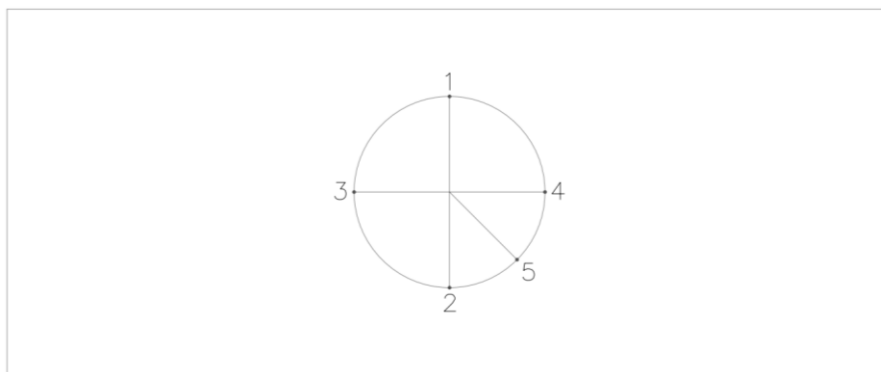


Figura 20 - Pontos de coleta de medidas
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Para cada furo foram realizadas três medições em diferentes profundidades, com incrementos de 5mm, seguindo o procedimento ilustrado na figura 20, assim definiu-se um padrão de medição para cada furo conforme mostrado na Figura 21.

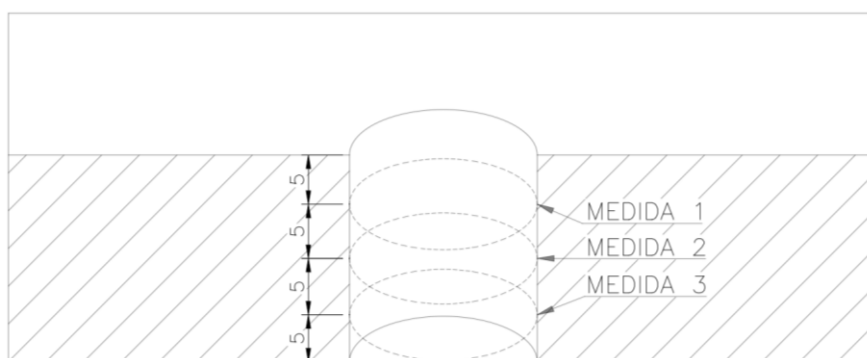


Figura 21 - Medidas realizadas nos furos
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Após realizadas todas as furações e medições foi realizado o levantamento dos dados em planilha e analisados, correlacionando-os os parâmetros de furação com as variações medidas.

3.3 Variáveis e Indicadores

Em qualquer pesquisa experimental, a definição clara das variáveis e dos indicadores é fundamental para a correta execução e análise dos resultados. De acordo com Gil (2002), uma variável pode ser entendida como qualquer característica, atributo ou fator que pode assumir diferentes valores ou aspectos, segundo os casos particulares ou as circunstâncias. Freitas (2013) complementa essa definição, afirmando que a variável é uma característica observável do fenômeno a ser estudado, podendo ser considerada uma classificação ou medida, uma

quantidade que varia, um conceito operacional que contém ou apresenta valores, um aspecto, propriedade ou fator discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração.

Por sua vez, um indicador é o instrumento que permite a operacionalização e a mensuração de uma variável. Segundo Marconi e Lakatos (2010), o indicador é definido como um instrumento de medida que torna a variável mensurável, podendo ser uma pergunta, um item de um questionário, uma escala de avaliação, entre outros meios que permitem a coleta de dados sobre a variável em questão.

Neste trabalho, as variáveis são classificadas em dois grupos principais. O primeiro grupo corresponde às variáveis independentes, também denominadas fatores de controle, que são os parâmetros de entrada do processo intencionalmente manipulados e controlados pelo pesquisador para observar seu efeito sobre o sistema. Essas variáveis representam as "causas" no estudo de causa e efeito. O segundo grupo corresponde às variáveis dependentes, também denominadas indicadores de resposta, que são as variáveis de saída do processo, medidas e analisadas para avaliar o impacto das mudanças nas variáveis independentes. Essas variáveis representam os "efeitos" observados no experimento.

A Tabela 3 apresenta de forma organizada as variáveis e os indicadores definidos para este estudo, alinhados com a metodologia de Planejamento de Experimentos (DoE) e a análise ANOVA de fator duplo com repetição utilizada no Capítulo 4.

Tabela 3 - Variáveis e Indicadores do Estudo

Tabela 5 – Variáveis e Indicadores do Estudo			
Categoria	Variavel/Indicador	Níveis ou Descrição	Papel no estudo
Variáveis independentes	Tipo de Broca	Broca 1: HSS	Fator categórico principal, avaliado separadamente
		Broca 2: MD + Revest. CrNi	
		Broca 3: MD+ Revest. TiAlN	
	Avanço(<i>f</i>)	0.2mm/volta	Fator quantitativo (Fator A na ANOVA)
		0.4mm/volta	
	Profundidade de medição	Nível 1: 5mm	Fator quantitativo (Fator B na ANOVA)
Nível 2: 10mm			
Nível 3: 15mm			
Variáveis Dependentes	Diâmetro do furo	Medido em milímetros (mm)	Indicador de precisão dimensional
	Circularidade do furo	Medido em milímetros (mm)	Indicador de qualidade geométrica de forma
	Excentricidade do furo	Medido em milímetros (mm)	Indicador de qualidade geométrica de posição

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

As variáveis independentes, ou fatores de controle, foram selecionadas por sua relevância no processo de furação, conforme apontado na revisão bibliográfica. O tipo de broca representa a influência combinada do material do substrato (HSS ou metal duro), da geometria da ponta e do tipo de revestimento sobre a qualidade do furo. Como cada broca possui características construtivas distintas, os resultados de cada uma são analisados separadamente na ANOVA. O avanço (f), com dois níveis (0,2 e 0,4 mm/volta), é um dos parâmetros de corte mais influentes na furação, afetando diretamente as forças de corte, a formação de cavaco e a qualidade superficial do furo conforme Sultan, Sharif e Kurniawan (2015). A profundidade de medição (p), com três níveis (5, 10 e 15 mm), permite avaliar como a qualidade do furo se altera ao longo de sua extensão, uma vez que em maiores profundidades as condições de corte se tornam mais severas devido à dificuldade de evacuação de cavacos e de acesso do fluido de corte conforme (BIERMANN *et al.*, 2018).

As variáveis dependentes, ou indicadores de resposta, foram escolhidas por representarem os principais critérios de qualidade geométrica e dimensional de um furo. O diâmetro é o indicador fundamental de precisão dimensional, refletindo a capacidade do processo de produzir furos dentro das tolerâncias especificadas. A circularidade avalia a qualidade da forma da seção transversal do furo, sendo sensível a vibrações, deflexões da ferramenta e irregularidades no corte. A excentricidade mede o desvio posicional do centro do furo em relação ao eixo nominal, sendo influenciada pela rigidez do sistema e pela geometria da ponta da broca de acordo com (ALBERTAZZI; SOUSA, 2018).

3.4 Instrumento de coleta de dados

Para realização do estudo apresentado, o procedimento foi desenvolvido com base no entendimento do processo de furação e seus fenômenos, assim como o estudo do processo de metrologia envolvido no problema, o entendimento e aplicação de técnicas de medição para levantamento de dados se fez necessário durante o desenvolvimento dos experimentos, para posterior análises e comparações.

Os dados coletados foram preenchidos para cada uma das brocas em uma tabela, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela para coleta de medidas em laboratório

	Avanço	Profundidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade
Broca			Furo 1			Furo 2			Furo 3		
	0,2mm/volta	5mm									
		10mm									
		15mm									
			Furo 4			Furo 5			Furo 6		
	0,4mm/volta	5mm									
		10mm									
		15mm									

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

3.5 Tabulação de dados

Durante a realização dos experimentos foi utilizado o *software Microsoft Office Excel*, para a tabulação e posterior análise dos dados obtidos.

3.6 Considerações finais

Neste capítulo, foram delineadas as abordagens adotadas no desenvolvimento deste estudo. Descreveram-se a natureza da pesquisa, seus propósitos, as técnicas empregadas, variáveis consideradas, indicadores relevantes e os instrumentos utilizados para a coleta de dados. O próximo capítulo abordará os resultados obtidos, promovendo discussões e destacando as contribuições significativas deste trabalho para o contexto geral do processo de furação.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados experimentais obtidos durante o processo de furação com a finalidade de compreender a influência das variáveis de processo analisadas, tipo de broca, velocidade de avanço e profundidade do furo, sobre a qualidade dos furos, onde analisou-se o diâmetro, a circularidade e a excentricidade das amostras.

A avaliação dos dados foi realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA) de fator duplo com repetição. A análise ANOVA é um método estatístico que permite identificar o impacto de um ou mais variáveis em um determinado resultado. Neste estudo, o objetivo foi verificar se as alterações no avanço e na profundidade do furo afetam de maneira estatisticamente relevante a precisão dimensional e geométrica dos furos produzidos por três tipos de brocas.

Para garantir a confiabilidade da análise, adotou-se um nível de confiança de 95%. Dessa forma, a significância estatística é confirmada quando o valor-P resultante do teste é inferior a 0,05. Nessas condições, a hipótese nula é rejeitada, comprovando que o fator analisado ou a interação entre os fatores tem influência significativa na qualidade final do furo.

4.1 Análise dos resultados da broca 1

Foram avaliados os efeitos do avanço e da profundidade sobre o diâmetro, circularidade e a excentricidade dos furos obtidos com a broca 1.

Os dados obtidos durante o experimento com a broca 1 foram tabulados e adicionados na tabela 5.

Tabela 5 - Medidas da broca 1 coletadas em laboratório

	Avanço	Profundidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade
Broca 1			Furo 1			Furo 2			Furo 3		
	0,2mm/volta	5mm	12,206	0,007	0,003	12,223	0,025	0,012	12,196	0,011	0,006
		10mm	12,246	0,004	0,002	12,241	0,06	0,032	12,212	0,04	0,02
		15mm	11,923	0,164	0,084	11,964	0,216	0,118	11,856	0,284	0,151
			Furo 4			Furo 5			Furo 6		
	0,4mm/volta	5mm	12,163	0,054	0,029	12,207	0,05	0,026	12,219	0,091	0,047
		10mm	12,234	0,055	0,029	12,177	0,022	0,012	12,255	0,076	0,042
		15mm	11,94	0,159	0,086	11,894	0,234	0,129	11,895	0,297	0,164

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

4.1.1 Análise estatística: Diâmetro do Furo - Broca 1

A Tabela 6 apresenta os resultados da ANOVA para a variável diâmetro da broca 1. A análise busca determinar se a variação nos parâmetros de velocidade de avanço e profundidade do furo resulta em uma mudança significativa no diâmetro dos furos.

Tabela 6 - Análise de Variância (ANOVA) para o Diâmetro – Broca 1

ANOVA DIÂMETRO BROCA 1						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra(Avanço)	0,000383	1	0,000382722	0,34354	0,568654171	4,747225347
Colunas(Profundidade)	0,368934	2	0,184467056	165,5816	1,82845E-09	3,885293835
Interações	4,74E-05	2	2,37222E-05	0,021294	0,978968437	3,885293835
Dentro	0,013369	12	0,001114056			
Total	0,382733	17				

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

De acordo com os resultados apresentados no teste podemos concluir que:

- Avanço (Amostra): O valor-P=0,569, é consideravelmente maior que o nível de significância de 0,05. Isso indica que não há evidência estatística para rejeitar a hipótese nula, ou seja, a alteração do avanço de 0,2 mm/volta para 0,4 mm/volta não causou uma variação significativa no diâmetro do furo. O valor $F=0,34$ é muito menor que o F crítico=4,75, reforçando que a variabilidade entre os grupos de avanço é menor que a variabilidade aleatória dentro dos grupos.

- Profundidade (Colunas): O valor-P $\approx 1,83 \times 10^{-9}$ é muito inferior a 0,5. Isso leva à rejeição da hipótese nula, confirmando que a profundidade do furo tem um efeito altamente significativo sobre o diâmetro. O valor $F=165,58$ é drasticamente superior ao F crítico=3,89, o que demonstra que a variação do diâmetro entre as diferentes profundidades (5,10 e 15mm) é

muito maior do que a variação aleatória. A maior parte da variabilidade total nos diâmetros (SQ Colunas=0,369 de um SQ Total=0,383) é explicada pela profundidade.

- Interação: O valor-P=0,979 indica que não há interação significativa entre avanço e profundidade. Isso significa que o efeito da profundidade no diâmetro é consistente, independentemente do avanço utilizado.

4.1.2 Análise estatística: Circularidade do Furo - Broca 1

A Tabela 7 apresenta os resultados da ANOVA para a variável circularidade da broca 1. A análise busca determinar se a variação nos parâmetros de velocidade de avanço e profundidade do furo resulta em uma mudança significativa na circularidade dos furos.

Tabela 7 - Análise de Variância (ANOVA) para a Circularidade– Broca 1

ANOVA CIRCULARIDADE BROCA 1						
<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>
Amostra(Avanço)	0,002863	1	0,002862722	1,629479	0,225926122	4,747225347
Colunas(Profundidade)	0,136068	2	0,068034056	38,72539	5,82885E-06	3,885293835
Interações	0,001501	2	0,000750389	0,427126	0,661921806	3,885293835
Dentro	0,021082	12	0,001756833			
Total	0,161514	17				

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

De acordo com os resultados apresentados no teste podemos concluir que:

- Avanço (Amostra): Com um valor-P=0,226 sendo maior que o valor de significância de 0,05, sendo assim o avanço não demonstrou ter um efeito significativo sobre a circularidade do furo.

- Profundidade (Colunas): O valor-P $\approx$ 5, 83x10⁻⁶, é muito menor que 0,05, e o valor F=38,73 é muito maior que o F crítico=3,89. Isso confirma que a profundidade tem um impacto significativo na circularidade.

- Interação: A interação entre os fatores não foi significativa obtendo um valor-P=0,662 maior que o valor de significância de 0,05.

4.1.3 Análise estatística: Excentricidade do Furo - Broca 1

A Tabela 8 apresenta os resultados da ANOVA para a variável excentricidade. A análise busca determinar se a variação nos parâmetros de velocidade de avanço e profundidade do furo resulta em uma mudança significativa na excentricidade dos furos.

Tabela 8 - Análise de Variância (ANOVA) para a Excentricidade – Broca 1

ANOVA EXCENTRICIDADE BROCA 1						
<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>
Amostra(Avanço)	0,001028	1	0,001027556	1,895276	0,193750543	4,747225347
Colunas(Profundidade)	0,040283	2	0,020141722	37,15043	7,22765E-06	3,885293835
Interações	0,000319	2	0,000159389	0,293985	0,750504438	3,885293835
Dentro	0,006506	12	0,000542167			
Total	0,048136	17				

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

De acordo com os resultados apresentados no teste podemos concluir que:

- Avanço (Amostra): O valor-P=0,194, mostra que o avanço não foi um fator influente para a excentricidade, visto que o valor é maior que a significância de 0,05.
- Profundidade (Colunas): O valor-P $\approx 7,23 \times 10^{-6}$ sendo muito menor que 0,05 e o valor F=37,15 muito acima do F crítico=3,89 indicam, de forma conclusiva, que a excentricidade do furo aumenta significativamente com a profundidade do furo. 3.
- Interação: A interação não se mostrou significativa sendo obtendo um valor-P=0,751 maior que 0,05.

4.1.4 Discussão dos Resultados - Broca 1

Para a Broca 1, os resultados são consistentes e claros, a profundidade de furação é o único fator dominante que afeta a qualidade dimensional e geométrica do furo. A variação do diâmetro, a perda de circularidade e o aumento da excentricidade estão todos fortemente correlacionados com a profundidade do furo. Este fenômeno é amplamente documentado na literatura conforme Tönshoff *et al.* (1994) e Biermann *et al.* (2018) afirmam que a medida que a furação progride, o aumento do atrito e da temperatura, combinado com a dificuldade na evacuação de cavacos, geram instabilidades que comprometem as dimensões do furo.

De acordo com Pop *et al.* (2024) e Bronis, Miko e Nozdrzykowski (2023) essas instabilidades podem causar vibrações e pequenas deflexões na broca, que resultam em um furo com diâmetro variável e forma imperfeita ou seja, apresente desvios de circularidade e excentricidade.

Os resultados mostram que a ferramenta manteve a estabilidade do corte em ambos os regimes de avanço testados. A ausência de significância do avanço sugere que a Broca possui uma geometria favorável para o tipo de furo realizado, e uma boa condição de corte, capaz de acomodar o aumento da taxa de remoção de material sem uma degradação notável da

qualidade do furo em pequenas profundidades conforme (SULTAN; SHARIF; KURNIAWAN, 2015).

4.2 Análise dos resultados da broca 2

Os resultados para a Broca 2 foram notavelmente similares aos da Broca 1, reforçando o padrão observado anteriormente.

Os dados coletados em laboratório utilizando a broca 2 estão mostrados na tabela 9.

Tabela 9 - Medidas da broca 2 coletadas em laboratório

Avanço		Profundidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade
Broca 2			Furo 1			Furo 2			Furo 3		
	0,2mm/volta	5mm	12,015	0,008	0,004	11,969	0,034	0,018	12,026	0,051	0,027
		10mm	12,009	0,035	0,018	11,987	0,016	0,008	12,015	0,66	0,034
		15mm	11,646	0,299	0,153	11,676	0,249	0,133	11,551	0,2	0,113
			Furo 4			Furo 5			Furo 6		
	0,4mm/volta	5mm	12,019	0,031	0,016	11,993	0,011	0,005	12,01	0,041	0,021
		10mm	11,994	0,019	0,01	11,993	0,01	0,005	12,003	0,23	0,12
		15mm	11,676	0,219	0,121	11,643	0,279	0,15	11,658	0,344	0,177

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

4.2.1 Análise estatística: Diâmetro do Furo - Broca 2

A Tabela 10 apresenta os resultados do teste ANOVA para a variável diâmetro. A análise busca determinar se a variação nos parâmetros de velocidade de avanço e profundidade do furo resulta em uma mudança significativa no diâmetro dos furos.

Tabela 10 - Análise de Variância (ANOVA) para o Diâmetro – Broca 2

ANOVA DIÂMETRO BROCA 2						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra(Avanço)	0,000501	1	0,000501389	0,512697	0,487674303	4,747225347
Colunas(Profundidade)	0,521605	2	0,260802389	266,6843	1,13487E-10	3,885293835
Interações	0,001399	2	0,000699389	0,715162	0,508825026	3,885293835
Dentro	0,011735	12	0,000977944			
Total	0,53524	17				

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

• Avanço (Amostra): O valor-P=0,488 confirma a ausência de significância estatística para o avanço por ser maior que o valor de significância de 0,05.

- Profundidade (Colunas): O valor- $P \approx 1,13 \times 10^{-10}$ é extremamente baixo e o valor $F=266,68$ demonstram que a profundidade é o fator mais influente na variação do diâmetro. A soma dos quadrados para a profundidade $SQ=0,522$ representa a quase totalidade da variação total $SQ \text{ Total}=0,535$, indicando seu domínio sobre o resultado.

- Interação: A interação não foi significativa sendo o valor- $P=0,509$.

4.2.2 Análise estatística: Circularidade do Furo - Broca 2

A Tabela 11 apresenta os resultados do teste ANOVA para a variável circularidade. A análise busca determinar se a variação nos parâmetros de velocidade de avanço e profundidade do furo resulta em uma mudança significativa na circularidade dos furos.

Tabela 11 - Análise de Variância (ANOVA) para a Circularidade – Broca 2

ANOVA CIRCULARIDADE BROCA 2						
<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>
Amostra(Avanço)	2,01E-05	1	2,00556E-05	0,015542	0,902850003	4,747225347
Colunas(Profundidade)	0,22326	2	0,111630167	86,50893	7,44398E-08	3,885293835
Interações	0,002173	2	0,001086722	0,842166	0,454721715	3,885293835
Dentro	0,015485	12	0,001290389			
Total	0,240939	17				

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

- Avanço (Amostra): O valor- $P=0,903$ é muito alto e mostra que o avanço não teve praticamente nenhum efeito na circularidade para esta broca.

- Profundidade (Colunas): O valor- $P \approx 7,44 \times 10^{-8}$ e o alto valor $F=86,51$ confirmam o forte impacto da profundidade na degradação da circularidade do furo.

- Interação: O valor- $P=0,455$ indica que a interação das variáveis não foi significativa.

4.2.3 Análise estatística: Excentricidade do Furo - Broca 2

A Tabela 12 apresenta os resultados do teste ANOVA para a variável excentricidade. A análise busca determinar se a variação nos parâmetros de velocidade de avanço e profundidade do furo resulta em uma mudança significativa na excentricidade dos furos.

Tabela 12 - Análise de Variância (ANOVA) para a Excentricidade – Broca 2

ANOVA EXCENTRICIDADE BROCA 2						
<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>
Amostra(Avanço)	0,00076	1	0,0007605	0,789082	0,391835744	4,747225347
Colunas(Profundidade)	0,05597	2	0,027984889	29,03666	2,52215E-05	3,885293835
Interações	0,000585	2	0,000292667	0,303666	0,743615246	3,885293835
Dentro	0,011565	12	0,000963778			
Total	0,068881	17				

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

- Avanço (Amostra): O valor- $P=0,392$ é menor que a significância de 0,05 e mostra que o avanço não foi um fator influente para a excentricidade.

- Profundidade (Colunas): O valor- $P \approx 2,52 \times 10^{-5}$ e o valor $F=29,04$ muito acima do $F_{\text{crítico}}=3,89$ indicam, de forma conclusiva, que a excentricidade do furo aumenta significativamente com a profundidade.

- Interação: A interação não se mostrou significativa sendo o valor- $P=0,744$.

4.2.4 Discussão dos Resultados - Broca 2

A Broca 2 exibe um comportamento quase idêntico ao da Broca 1. A análise estatística confirma que a profundidade é o único parâmetro de processo com influência significativa sobre o diâmetro, a circularidade e a excentricidade. A consistência desses resultados entre duas ferramentas diferentes sugere que, para este tipo de broca e material, a degradação da qualidade do furo com a profundidade é um efeito intrínseco e dominante do processo de furação, superando a influência da variação do avanço na faixa estudada.

4.3 Análise dos resultados da broca 3

Os resultados obtidos com a Broca 3 revelaram um comportamento distinto e mais complexo em comparação com as brocas anteriores. Para esta ferramenta, todos os fatores 36 analisados, mostraram-se significativos em todas as variáveis de qualidade do furo, indicando uma maior sensibilidade da ferramenta às condições de corte.

Os dados obtidos durante o experimento com a broca 3 foram tabulados e adicionados na tabela 13.

Tabela 13 - Medidas da broca 3 coletadas em laboratório

Avanço		Profundidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade	Diâmetro	Circularidade	Excentricidade
Broca 3			Furo 1			Furo 2			Furo 3		
	0,2mm/volta	5mm	12,024	0,01	0,005	12,038	0,015	0,008	12,049	0,035	0,019
		10mm	12,037	0,22	0,012	12,075	0,063	0,032	12,045	0,027	0,014
		15mm	11,622	0,226	0,129	11,597	0,257	0,143	11,664	0,273	0,149
			Furo 4			Furo 5			Furo 6		
	0,4mm/volta	5mm	12,045	0,024	0,012	12,054	0,034	0,018	12,041	0,025	0,013
		10mm	11,995	0,122	0,067	12,049	0,042	0,021	12,044	0,027	0,014
		15mm	12,022	0,073	0,044	12,052	0,021	0,011	12,069	0,059	0,031

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

4.3.1 Análise estatística: Diâmetro do Furo - Broca 3

A Tabela 14 apresenta os resultados do teste ANOVA para o diâmetro do furo produzido pela Broca 3. Os dados brutos revelam um padrão diferente, no avanço de 0,2 mm/volta, a média do diâmetro a 15 mm de profundidade (11,628 mm) é consideravelmente inferior às médias a 5 mm de profundidade (12,037 mm) e 10 mm de profundidade (12,052 mm), sugerindo uma contração significativa do furo em profundidade. Já no avanço de 0,4 mm/volta, as médias nas três profundidades são muito mais próximas entre si (12,047 mm, 12,029 mm e 12,048 mm), indicando que o avanço maior alterou o perfil dimensional do furo ao longo de sua profundidade.

Tabela 14 - Análise de Variância (ANOVA) para a Diâmetro– Broca 3

ANOVA DIÂMETRO BROCA 3						
<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>
Amostra(Avanço)	0,082689	1	0,082688889	154,7676	3,23272E-08	4,747225347
Colunas(Profundidade)	0,165923	2	0,082961722	155,2783	2,65126E-09	3,885293835
Interações	0,182845	2	0,091422389	171,114	1,51144E-09	3,885293835
Dentro	0,006411	12	0,000534278			
Total	0,437868	17				

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A análise ANOVA do diâmetro da Broca 3 revela um cenário diferente do observado nas Brocas 1 e 2, onde apenas a profundidade era significativa. • O avanço apresentou um valor- $P \approx 3,23 \times 10^{-8}$, inferior ao nível de significância de 0,05, e o valor F calculado=154,77 superou o F crítico=4,75. Isso indica que a mudança do avanço 37 de 0,2 para 0,4 mm/volta teve um impacto direto na variação do diâmetro. O aumento do avanço eleva proporcionalmente a força de avanço, o que pode causar deformação plástica na parede do furo ou o fenômeno de aresta postiça de corte APC, onde o diâmetro efetivo do furo se torna maior que o diâmetro nominal da broca, como citado por (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999) e (FERRARESI, 2018). A soma dos quadrados do avanço ($SQ=0,083$) representa aproximadamente 18,9% da variação total, uma contribuição considerável que contrasta com as Brocas 1 e 2, onde o avanço contribuía com menos de 0,1% da variação total.

• A profundidade manteve-se como um fator crítico, o valor- $P \approx 2,65 \times 10^{-9}$, com um valor $F=155,28$, confirma a variação significativa do diâmetro ao longo da profundidade do furo. A soma dos quadrados da profundidade $SQ=0,166$ representa 37,9% da variação total. Esse resultado é consistente com a literatura, que aponta o acúmulo de calor, o desgaste progressivo da ferramenta e a dificuldade de evacuação de cavacos como fatores que se

intensificam com o aumento da profundidade, como mencionado por (BIERMANN *et al.*, 2018) e (CASTILLO, 2005).

- A interação entre avanço e profundidade obteve um valor- $P \approx 1,51 \times 10^{-9}$ e um valor $F=171,11$, é o maior entre todos os fatores, a interação é a fonte de variação mais influente, representando 41,8% da variação total $SQ=0,183$. Isso significa que o efeito do avanço no diâmetro depende fortemente da profundidade do furo e da velocidade em que a ferramenta avança na peça, conforme explicado por Montgomery (2013) quando a interação é significativa, a análise dos efeitos principais isolados pode ser equivocada, pois o comportamento do sistema não apresenta linearidade. A combinação de condições de corte ultrapassa a capacidade da ferramenta de manter a estabilidade, levando a um comportamento imprevisível e a perda de controle dimensional. O erro experimental $SQ_{Dentro}=0,006$ representa apenas 1,5% da variação total, indicando que o modelo captura quase toda a variabilidade dos dados.

4.3.2 Análise estatística: Circularidade do Furo - Broca 3

A Tabela 15 mostra que diferença apresentada no diâmetro se estende à circularidade do furo. Os dados evidenciam um comportamento diferente das outras brocas, no avanço de 0,2 mm/volta, a circularidade média aumenta progressivamente de 0,020 (5 mm) para 0,037 (10 mm) e atinge 0,252 (15 mm), indicando uma forte degradação da forma circular em profundidade. No entanto, no avanço de 0,4 mm/volta, a circularidade média é de 0,028 (5 mm), 0,064 (10 mm) e apenas 0,051 (15 mm), ou seja, a circularidade a 15 mm é melhor do que a 10 mm, invertendo a tendência observada com avanço menor. Essa inversão é a demonstração da interação entre os fatores.

Tabela 15 - Análise de Variância (ANOVA) para a Circularidade– Broca 3

ANOVA CIRCULARIDADE BROCA 3						
<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>
Amostra(Avanço)	0,013945	1	0,0139445	18,15296	0,001106283	4,747225347
Colunas(Profundidade)	0,054422	2	0,027210889	35,42316	9,23524E-06	3,885293835
Interações	0,047785	2	0,023892667	31,10349	1,78821E-05	3,885293835
Dentro	0,009218	12	0,000768167			
Total	0,12537	17				

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

- O avanço foi significativo com um valor- $P=0,0011$ e com um valor $F=18,15$ que excede o F crítico=4,75. A soma dos quadrados do avanço $SQ=0,014$ representa 11,1% da variação total. Isso confirma que a taxa de remoção de material influencia diretamente a forma geométrica do furo para esta broca. Um avanço maior gera forças radiais mais

elevadas, que podem deformar a seção transversal do furo, tornando-o ovalizado, como citado por Tönshoff *et al.* (1994) e Ferraresi (2018). Nas Brocas 1 e 2, o avanço contribuía com menos de 2% da variação total da circularidade, evidenciando a maior sensibilidade da Broca 3.

- A profundidade é o fator com maior contribuição individual, sendo $SQ=0,054$, representando 43,4% da variação total, com um valor- $P \approx 9,24 \times 10^{-6}$ e valor $F=35,42$. A degradação da circularidade com a profundidade é um fenômeno bem documentado na literatura, associado ao aumento da deflexão da ferramenta e as vibrações que se amplificam à medida que a broca penetra mais fundo no material, como mencionado por (BIERMANN *et al.*, 2018).

- A interação é novamente altamente significativa (valor- $P \approx 1,79 \times 10^{-5}$, com um valor $F=31,10$ e uma contribuição de 38,1% da variação total $SQ=0,048$). A magnitude da contribuição da interação, quase tão grande quanto a da profundidade, o que indica que a forma do furo é determinada não apenas pelos fatores isolados, mas também pela combinação específica de avanço e profundidade. As piores condições geométricas não ocorrem necessariamente nos níveis mais extremos de cada fator, mas em combinações específicas que desestabilizam o processo de corte, como citado por (MONTGOMERY, 2013)

4.3.3 Análise estatística: Excentricidade do Furo - Broca 3

A análise da excentricidade apresentada na tabela 16 indica o quadro de instabilidade da Broca 3. Os dados brutos mostram que, no avanço de 0,2 mm/volta, a excentricidade média cresce de 0,011 (5 mm) para 0,019 (10 mm) e atinge 0,140 (15 mm), um aumento de quase 13 vezes. Já no avanço de 0,4 mm/volta, a excentricidade média é de 0,014 (5 mm), 0,034 (10 mm) e apenas 0,029 (15 mm), novamente invertendo a tendência de degradação em profundidade. Essa inversão reforça a existência de uma interação entre os fatores.

Tabela 16 - Análise de Variância (ANOVA) para a Excentricidade– Broca 3

ANOVA EXCENTRICIDADE BROCA 3						
<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>
Amostra(Avanço)	0,004356	1	0,004355556	18,71122	0,000986246	4,747225347
Colunas(Profundidade)	0,017459	2	0,008729389	37,50095	6,88517E-06	3,885293835
Interações	0,014691	2	0,007345722	31,5568	1,66255E-05	3,885293835
Dentro	0,002793	12	0,000232778			
Total	0,039299	17				

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

- O avanço mostrou-se significativo apresentando um valor- $P=0,001$ e um valor $F=18,71$ que supera o F crítico= $4,75$. A soma dos quadrados do avanço $SQ=0,004$ representa 11,1% da variação total. Isso indica que a variação do avanço influencia diretamente o deslocamento do eixo do furo em relação à posição programada. Um avanço mais elevado pode amplificar as vibrações laterais da ferramenta, causando um desvio progressivo da trajetória ideal, como citado por (CASTILLO, 2005).

- A profundidade é o fator com maior contribuição individual $SQ=0,017$, representando 44,4% da variação total, com um valor- $P\approx 6,89 \times 10^{-6}$ e valor $F=37,50$. A excentricidade tende a aumentar com a profundidade porque a broca, ao se aprofundar torna-se mais suscetível a deflexões laterais. Esse fenômeno é descrito por Biermann *et al.* (2018) como um dos principais desafios da furação profunda, onde a relação comprimento/diâmetro da ferramenta amplifica qualquer instabilidade inicial.

- A interação é altamente significativa valor- $P\approx 1,66 \times 10^{-5}$, com um valor $F=31,56$ e uma contribuição de 37,4% da variação total $SQ=0,015$. A interação entre avanço e profundidade na excentricidade interfere na excentricidade do furo de forma que a posição do furo não pode ser prevista de forma simples a partir dos parâmetros individuais. A deflexão da ferramenta é amplificada de forma não linear pela combinação de forças de avanço elevadas e comprimento, explicado por (TÖNSHOFF *et al.*, 1994).

4.3.4 Discussão dos resultados - broca 3

A Broca 3 apresenta um cenário distinto e mais complexo do que o observado nas ferramentas anteriores. Para esta broca, todas as variáveis de processo mostraram-se estatisticamente significativas em relação ao diâmetro, circularidade e excentricidade do furo. Esse comportamento indica uma sensibilidade da ferramenta às condições de usinagem utilizadas.

Diferente das outras brocas, para a broca 3 o avanço apresentou uma grande contribuição na variação dimensional. A variação de 0,2 para 0,4 mm/volta demonstrou ter impacto direto na qualidade do furo, o que pode ser explicado pelo aumento das forças radiais e da força de avanço. Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (1999) um avanço maior eleva proporcionalmente a força de avanço, podendo causar deformação plástica na parede do furo ou o fenômeno de 40 aresta postiça de corte, onde o diâmetro efetivo se torna maior que o nominal. Como descrito por Tönshoff *et al.* (1994), as forças radiais elevadas podem deformar a seção transversal do furo, tornando-o ovalizado.

A profundidade continuou sendo um fator relevante na qualidade do furo, apontando que a o acúmulo de calor, desgaste progressivo da ferramenta e dificuldade de evacuação de cavacos intensificam-se à medida que a broca penetra no material, aumentando a deflexão da ferramenta e as vibrações, como discutido por (BIERMANN *et al.*, 2018) e (CASTILLO, 2005).

A combinação de um avanço elevado com a profundidade do furo cria um cenário de instabilidade cumulativa, nessas condições, a ferramenta começa a vibrar e desvia-se de sua trajetória ideal, resultando em furos com diâmetro irregular, baixa circularidade e desalinhamento do eixo, fenômenos observados por Aamir *et al.* (2023). Visto que a interação entre os fatores foi significativa para a broca 3 Hair (2014) reforça que, na presença de interação significativa, a interpretação dos efeitos principais isolados deve ser feita com cautela, pois o comportamento do sistema não apresenta linearidade.

Para essas condições de processo a broca 3 trabalha em um regime sensível, onde qualquer alteração nos parâmetros de corte possui consequências significativas e interdependentes. O teste ANOVA quantificou essa instabilidade, demonstrando que a qualidade do furo é determinada não apenas pelos fatores isolados, mas pela combinação específica de avanço e profundidade que pode estabilizar ou desestabilizar o processo de corte.

4.4 Discussão comparativa do desempenho das brocas

Para compreender o comportamento das diferentes ferramentas estudadas, é necessário analisar a contribuição relativa de cada variável de processo para a variação dimensional e geométrica dos furos. A Tabela 17 apresenta a contribuição percentual das variáveis para cada broca, calculada a partir da razão entre a Soma dos Quadrados (SQ) de cada fator e a Soma Total dos Quadrados (SQ Total) obtida nos testes ANOVA.

Conforme a metodologia recomendada por Montgomery (2013), o cálculo da contribuição percentual permite decompor a variância total, identificando de forma quantitativa quais fatores dominam o processo.

Tabela 17 - Contribuição percentual das variáveis n'º resultado da broca

Variável Dependente	Fonte de Variação	Broca 1 (HSS)	Broca 2 (MD CrSi)	Broca 3 (MD TiAlN)
Diâmetro	Avanço	0,4%	0,1%	18,9%
	Profundidade	96,4%	97,5%	37,9%
	Interação	0,03%	0,3%	41,8%
	Erro residual	3,17%	2,1%	1,4%
Circularidade	Avanço	1,8%	0,01%	11,1%
	Profundidade	84,3%	92,7%	43,4%
	Interação	0,9%	0,9%	38,1%
	Erro residual	13,0%	6,39%	7,4%
Excentricidade	Avanço	2,1%	1,1%	11,1%
	Profundidade	83,8%	81,3%	44,4%
	Interação	0,7%	0,8%	37,4%
	Erro residual	13,4%	16,8%	7,1%

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 17 apresenta de forma a contribuição percentual de cada variável de processo sobre a variação total dos indicadores de qualidade para as três brocas analisadas. Essa contribuição é calculada pela razão entre a Soma dos Quadrados (SQ) de cada fator e a Soma Total dos Quadrados (SQ Total) obtida nos testes ANOVA.

Para as Brocas 1 e 2, a análise revela um comportamento dominado por um único fator. No caso do diâmetro, a profundidade do furo é responsável por 96,34% da variação na Broca 1 $SQ=0,369$ de um $SQ\ Total=0,383$ e por 97,57% na Broca 2 $SQ=0,522$ de um $SQ\ Total=0,535$. Esse domínio da profundidade repete-se para a circularidade e a excentricidade, onde os valores de contribuição do avanço e da interação são inferiores a 2%, e os seus valores-P indicam que não são estatisticamente significativos. Isso significa que, para estas ferramentas, o aumento do avanço não compromete a estabilidade da ferramenta, concentrando toda a degradação geométrica e dimensional na dificuldade inerente do aprofundamento, como o aumento das forças de corte, o acúmulo de calor e a dificuldade de evacuação de cavacos.

Em contrapartida, a Broca 3 apresenta um cenário de instabilidade multifatorial. Para o diâmetro, a variação se distribui entre a profundidade 37,9%, $SQ=0,166$, o avanço 18,9%, $SQ=0,083$ e, a interação entre eles 41,8%, $SQ=0,183$. Na circularidade, a profundidade apresenta 43,4%, $SQ=0,054$, a interação 38,1%, $SQ=0,048$ e o avanço 11,1%, $SQ=0,014$. Na excentricidade, o padrão se mantém, com a profundidade em 44,4%, $SQ=0,017$, a interação em 37,4%, $SQ=0,015$ e o avanço em 11,1%, $SQ=0,004$.

O fato de a interação ser o fator predominante no diâmetro da Broca 3 e se aproximar com a profundidade na circularidade e excentricidade indica que a qualidade do furo não pode ser prevista apenas pelo avanço ou pela profundidade isoladamente. O elevado percentual de interação confirma que as piores condições geométricas dos furos não ocorrem necessariamente nos níveis extremos de cada fator isolado, mas em combinações específicas que desestabilizam o corte como apresentado por (MONTGOMERY, 2013). É importante notar que o termo do erro experimental na Broca 3 representa apenas 1,5% da variação total no diâmetro, o que demonstra que o modelo estatístico capturou com precisão a variabilidade causada pelos parâmetros de usinagem, confirmando a forte dependência das condições específicas de corte para a broca 3.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo conclui os resultados e as análises apresentadas ao longo do trabalho, verificando o cumprimento dos objetivos propostos e respondendo à pergunta-problema da pesquisa. São apresentadas as conclusões obtidas a partir da análise estatística e sugeridas direções para trabalhos futuros que possam aprofundar e expandir o conhecimento.

5.1 Conclusão

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar e analisar o impacto das variáveis de processo na variação dimensional e geométrica de furos realizados em aço de médio carbono, utilizando três tipos distintos de brocas.

A aplicação do teste ANOVA de fator duplo com repetição permitiu quantificar a influência do avanço, da profundidade e da interação entre eles sobre cada indicador de qualidade, para cada uma das brocas. A análise estatística não apenas identificou quais fatores eram significativos, mas também mediu a magnitude de sua contribuição percentual para a variação total, respondendo à pergunta-problema, porém a resposta a essa pergunta, revelou-se dependente da ferramenta utilizada:

- Para as Brocas 1 e 2, a interferência das variáveis de processo foi dominada exclusivamente pela profundidade de medição. Este fator foi o único estatisticamente significativo, explicando mais de 90% da variação no diâmetro, circularidade e excentricidade. A variação do avanço, na faixa estudada, não apresentou influência relevante. Isso indica que a perda de qualidade do furo é um fenômeno intrínseco ao aprofundamento do corte devido ao aumento do atrito, calor e dificuldade de escoamento de cavacos.

- Para a Broca 3, a interferência das variáveis de processo foi diferente. Todos os fatores mostraram-se estatisticamente significativos para todas as variáveis de resposta. A interação foi o fator mais relevante, contribuindo de 37% a 42% da variação total. Isso demonstra que, para esta broca, o efeito de uma variável depende do nível da outra, caracterizando um comportamento de processo instável e não linear.

5.2 Recomendações

Com base nos resultados e nas limitações deste estudo, diversas oportunidades para pesquisas futuras podem ser identificadas:

- **Análise do Desgaste da Ferramenta:** Realizar um estudo sistemático do desgaste das brocas antes e após os ensaios. Isso permitiria correlacionar a microgeometria da aresta de corte e o desgaste com a instabilidade observada nos resultados, validando as hipóteses levantadas na discussão.

- **Análise da Rugosidade Superficial:** Incluir a medição da rugosidade da parede do furo como uma variável de resposta adicional. A rugosidade é um indicador de qualidade crucial e sua análise poderia fornecer mais informações sobre a estabilidade do corte e a eficiência da evacuação de cavacos.

- **Monitoramento de Forças e Vibrações:** Instrumentar o processo com sensores para medir as forças de avanço, o torque e as vibrações em tempo real. A correlação desses sinais com os resultados de qualidade do furo permitiria compreender os mecanismos de instabilidade do processo de furação.

- **Estudo de Outros Materiais:** Replicar o experimento utilizando outros materiais de alta relevância industrial, como aços inoxidáveis, ligas de titânio ou compósitos, para verificar se o comportamento observado nas brocas se mantém em diferentes condições de usinabilidade.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AAMIR, M.; DAVIS, A.; TOLOUEI-RAD, M.; GIASIN, K.; VAFADAR, A. **Experimental assessment of hole quality and tool condition in the machining of an aerospace alloy**. Machines, MDPI, v. 11, n. 7, p. 726, 2023.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. d. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri - SP: Manole, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405:1988: Rugosidade das superfícies**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158:1995: Sistema de tolerâncias e ajustes**. Rio de Janeiro, 1995.

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

Atlas Copco. **The role of the manual drill in the aerospace manufacturing industry**. 2023. [https://www.atlascopco.com/en-us/itba/expert-hub/articles/the-role-of-the-manualdrill in-the-aerospace-manufacturing-industry](https://www.atlascopco.com/en-us/itba/expert-hub/articles/the-role-of-the-manualdrill-in-the-aerospace-manufacturing-industry) Acesso: 2026-05-24.

BIERMANN, D.; BLEICHER, F.; HEISEL, U.; KLOCKE, F.; MöHRING, H.-C.; SHIH, A. **Deep hole drilling**. CIRP Annals, Elsevier, v. 67, n. 2, 2018.

BRONIS, M.; MIKO, E.; NOZDRZYKOWSKI, K. **Drilling strategies to improve the geometrical and dimensional accuracy of deep through holes made in pa6 alloy**. Materials, v. 16, n. 1, 2023. ISSN 1996-1944. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/1/110>

CASTILLO, W. J. G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento gg25 com brocas de metal-duro com canais retos**. Universidade Federal de Santa Catarina, v. 1, p. 134, 2005. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/101938>

DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. M M editora, 1999. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=fMjVtwAACAAJ>.

BORDINASSI, Éd Claudio. **Estudo do processo de furação em aço com brocas helicoidais de aço rápido**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 13 dez. 2024.

- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Blucher, 2018. ISBN 9788521214199. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=32knyQEACAAJ>
- FIELD, A. **Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics**. 5. ed. London: SAGE Publications, 2018.
- FREITAS, C. de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico** - 2ª Edição. Editora Feevale, 2013. ISBN 9788577171583. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=zUDsAQAAQBAJ>.
- GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Atlas, 2002. ISBN 9788522431694. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=X4uvAAAACAAJ>.
- HALEVI, G. **Process and operation planning**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 1402016530.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. (RWTHedition). Translated by Aaron Kuchle. ISBN 978-3-642-11978-1.
- MACHADO, A.; ABRÃO, A.; COELHO, R.; SILVA, M. da. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.
- MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. Editora Atlas S.A., 2010. ISBN 9788522457588. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Y2WFRAAAACAAJ>
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- OSG Corporation. **EgiAs Coating**. 2025. Acesso em: 31 maio 2026. Disponível em: <https://osg.com.br/produtos/revestimentos/egias/>
- POP, A.-B.; TITU, A. M.; RAVAI-NAGY, S.; DARABA, C. **Influence of machining parameters on the dimensional accuracy of drilled holes in engineering plastics**. *Polymers*, v. 16, n. 11, p. 1490, 2024. ISSN 2073-4360. Disponível em: <https://www.mdpi.com/20734360/16/11/1490>
- SULTAN, A.; SHARIF, S.; KURNIAWAN, D. **Effect of machining parameters on tool wear and hole quality of aisi 316l stainless steel in conventional drilling**. *Procedia Manufacturing*, v. 2, p. 202–207, 2015. ISSN 2351-9789. 2nd International Materials,

Industrial, and Manufacturing Engineering Conference, MIMEC2015, 4-6 February 2015, Bali, Indonesia. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978915000360>

TÖNSHOFF, H.; SPINTIG, W.; KÖNIG, W.; NEISES, A. **Machining of holes developments in drilling technology**. CIRP Annals, v. 43, n. 2, p. 551–561, 1994. ISSN 0007-8506. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607605010>

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017