UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

DAMIÃO MANUEL MALAMBA

A Influência das Condições de Corte no Desgaste, na Rugosidade e Circularidade na Furação Profunda de Aço Ferramenta VTMPlus com Broca Canhão de Metal Duro Revestida com TiAlN

CAMPINAS
2024

DAMIÃO MANUEL MALAMBA

A Influência das Condições de Corte no Desgaste, na Rugosidade e Circularidade na Furação Profunda de Aço Ferramenta VTMPlus com Broca Canhão de Metal Duro Revestida com TiAlN

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO(A) ALUNO DAMIÃO MANUEL MALAMBA, E ORIENTADA PELO(A) PROF. DR. AMAURI HASSUI

CAMPINAS
2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Malamba, Damião Manuel, 1995-
M291i A influência das condições de corte no desgaste, na rugosidade e circularidade na furação profunda de aço ferramenta VTMPlus com broca canhão de metal duro revestida com TiAlN / Damião Manuel Malamba. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Amauri Hassui.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Usinagem. 2. Ferramenta de corte. 3. Desgaste mecânico. 4. Aspereza de superfície. 5. Medidas de superfície. 6. Aço-ferramenta. I. Hassui, Amauri, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: The Influence of cutting conditions on wear, roughness, and circularity in deep drilling of VTMPlus tool steel with TiAlN-coated carbide gun drill
Palavras-chave em inglês:
Machining
Cutting tool
Mechanical wear
Surface roughness
Surface measurements
Tool steel
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora:
Amauri Hassui [Orientador]
Milla Caroline Gomes
Daniel Iwao Suyama
Data de defesa: 02-08-2024
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)
- ORCID do autor: https://orcid.org/0009-0008-8884-0261
- Currículo Lattes do autor: http://lattes.cnpq.br/2873609047385228

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

A Influência das Condições de Corte no Desgaste, na Rugosidade e Circularidade na Furação Profunda de Aço Ferramenta VTMPlus com Broca Canhão de Metal Duro Revestida com TiAlN

Autor: Damião Manuel Malamba
Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Amauri Hassui, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual de Campinas

Prof (a). Dr (a). Milla Caroline Gomes
Faculdade de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama
Faculdade de Ciências Aplicadas / Universidade Estadual de Campinas

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 2 de agosto de 2024.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus familiares, especialmente a minha mãe Maria de Fátima Pemba e meu pai António Casimiro Malamba (*in memoriam*), pelo incentivo, estímulo, instrução e educação que foi uma luta para que o meu futuro fosse promissor. Hoje com mais um grau de formação acadêmica alcançado, sei que os vossos corações exultam de alegria pela missão cumprida. Dedico também a todos os profissionais da área e não só aos que com muito esforço tem contribuído pelo avanço de Engenharia, Tecnologia e Inovação. E a ti minha querida e amada noiva pela paciência, auxílio, carinho e compreensão.

Agradecimentos

De antemão, gostaria de estender os meus mais profundos votos de agradecimento à Deus Todo Poderoso, Criador do Céu e da Terra, de todas as coisas visíveis e invisíveis. Que traçou esta sina, impediu toda força negativa e permitiu que ocorressem coisas boas em prol do sucesso aqui obtido.

Em seguida, a minha gratidão é estendida aos meus familiares que apesar das grandes dificuldades que atravessamos, nunca deixaram de me apoiar financeira e moralmente. Especialmente, a minha belíssima, guerreira e batalhadora mãe que sempre esteve presente em todos os momentos da minha vida, pois a distância só nos afastou, porém nunca nos separou.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Amauri Hassui que com grande paciência e didática me emanou de muito conhecimento e experiência, no ramo profissional e na vida social. E por ter crido no meu potencial e entendido as minhas dificuldades outrora demonstradas. Sou-lhe muito grato pela orientação e encorajamento.

Aos professores da FEM -UNICAMP, com grande particularidade ao Prof. Dr. Anselmo Diniz que sempre esclareceu as minhas preocupações com zelo e serenidades relativamente ao curso e o campo da usinagem.

Ao Professor Serguei Ivanovitchi Kalganov da Universidade Federal do Cáucaso Norte (North-Caucasus Federal University - NCFU) – Stavropol, Rússia.

Ao Professor Alexandre Cardoso da empresa ISCAR e Formador do SENAI Roberto Mange no curso de Programação, Preparação e Operação de Centro de Usinagem CNC – Campinas - SP, Brasil.

Ao Instituto Nacional de Gestão de Bolsa de Estudo (INAGBE) pela bolsa que me foi atribuída, permitindo assim a conclusão de mais uma etapa da vida.

Aos amigos que foram pacientes em compreender os momentos que precisei me dedicar na pesquisa, mas que estiveram sempre me apoiando.

Às empresas CNPEM, ISCAR, Blaser Swisslube do Brasil Ltda, FL - Metrologia e Soluções Técnicas Ltda por disponibilizarem as máquinas, ferramentas, equipamentos, espaços, informações entre outros recursos afim de tornar possível a pesquisa.

Ao Projeto Rota2030 pela orientação e acompanhamento ao longo de todo esse percurso.

“Devemos não somente ensinar o que sabemos e aprendemos, mas também examiná-los e debatê-los”.

Resumo

A furação profunda é o processo de usinagem que realiza furos com auxílio de brocas especiais em alguns casos também máquinas, no qual a relação entre o comprimento e o diâmetro é maior que 10. Neste processo ocorrem desgastes da ferramenta, desvio de circularidade, rugosidade etc. Em geral, o desgaste da ferramenta de corte é indesejável e tem importância tecnológica e econômica. Atingir a melhor qualidade é a necessidade básica de toda indústria e isso possibilita um funcionamento adequado da peça usinada. Caso contrário, a peça poderá ser rejeitada, e o furo é somente um detalhe de uma peça grande, isso causaria enormes prejuízos, uma vez que a furação é quase sempre selecionada como última operação. Para contribuir com o estudo e a compreensão sobre a furação profunda, o presente trabalho, com auxílio de um planejamento experimental, discute os efeitos da velocidade de corte e avanço no desgaste da ferramenta, desvio de circularidade e rugosidade do furo usinado ao realizar um furo no aço ferramenta VTMPlus recozido com broca canhão de metal duro revestida com TiAlN e fluido de corte emulsionável VASCO 5000, com dois níveis de velocidades de corte (60 e 70 m/min) e três de avanço (0,01;0,02 e 0,03 mm/rev.). Mas antes disso, foi realizado um furo piloto com uma fresa de topo por causa do design assimétrico da broca canhão e da instabilidade no início da furação. Os resultados obtidos indicam que tanto o desgaste, quanto a rugosidade e a circularidade são influenciadas pela velocidade de corte e avanço. E a melhor condição de corte utilizada nesta pesquisa que pode elevar a produção sem muito prejudicar o desgaste da ferramenta de corte, desvio de circularidade e a rugosidade do furo é velocidade de corte 70 m/min e avanço 0,03 mm/rev.

Palavras-chave: Furação profunda, Broca canhão, Desgaste, Rugosidade, Circularidade.

Abstract

Deep drilling is the machining process that makes holes with the aid of special drills, in some cases also special machines, where the ratio between length and diameter is greater than 10. In this process, tool wear, circularity deviation, roughness, etc., occur. In general, cutting tool wear is undesirable and has technological and economic importance. Achieving the best quality is a fundamental necessity for all industries, enabling the proper functioning of the machined part. Otherwise, the part may be rejected, and the hole that is just a small detail of a large partthat would cause enormous losses, since drilling is almost always selected as the last machining operation. To contribute to the study and understanding of deep drilling, this work, aided by experimental design, discusses the effects of cutting speed and feed rate on tool wear, circularity deviation, and roughness of the machined hole when drilling with a TiAlN-coated carbide gun drill in tool steel VTMPlus annealed, using an emulsion cutting fluid (VASCO 5000), with two cutting speed levels (60 and 70 m/min) and three feed rates (0.01, 0.02, and 0.03 mm/rev). Prior to this, a pilot hole was drilled with an end mill due to the asymmetric design of the gun drill and instability at the start of drilling. The results obtained indicate that both wear, roughness, and circularity are influenced by cutting and feed speed. The best cutting condition used in this research that can increase production without greatly compromising tool wear, circularity deviation, and hole roughness is a cutting speed of 70 m/min and a feed rate of 0.03 mm/rev.

Key words: Deep drilling, Gun drill, Wear, Surface roughness, Circularity.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Distribuição a) número de processos de usinagem e (b) tempo de usinagem completo 17
Figura 2– Algumas operações de furação 20
Figura 3 – Classificação da broca de modo geral 21
Figura 4 – Métodos do processo de furação 22
Figura 5 – Tipos de brocas para furação profunda 27
Figura 6 – Broca canhão e seus componentes 29
Figura 7 – A geometria da cabeça da broca canhão e suas partes 30
Figura 8 – Construção da cabeça e ângulos da broca canhão 31
Figura 9 – Princípio esquemático do processo de furação com broca canhão 32
Figura 10 – Modos de operação das máquinas 33
Figura 11 – Furação com bucha guia ou furo piloto 34
Figura 12 – teorias de formação de cavacos formuladas – a) Fink b) Heilmann 36
Figura 13 – Parâmetros de furação: (a) furação em cheio e (b) furação com pré-furo 37
Figura 14 – a) Análise do esforço geral da broca canhão b) Decomposição de força simplificada na guia 39
Figura 15 – Erros frequentemente encontrado no furo 40
Figura 16 – Tolerância de circularidade 42
Figura 17 – Rugosidade 44
Figura 18 – Fatores que influenciam a rugosidade de superfície usinadas 44
Figura 19 – a) Rugosidade média (Ra); b) Perfis de rugosidades com o mesmo valor de Ra e diferentes aspectos 46
Figura 20 – Materiais para ferramenta de corte com geometria definida 48
Figura 21 – Metal duro com revestimento múltiplo (WC/Co) 51
Figura 22 – Classificação de fluidos de corte 54
Figura 23 – gráfico de pressão e vazão de fluido de corte 56
Figura 24 – Aplicação de fluido de corte forma: a) externa e b) interna 56
Figura 25 – Mecanismo de desgaste e desgaste da ferramenta 57
Figura 26 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte 58
Figura 27 – Avarias e mecanismo de desgaste 59

Figura 28 – Caracterização dos diferentes tipos de desgaste para uma broca canhão.....61
Figura 29 – Desgaste da ferramenta de corte 62
Figura 30 – Etapas de condução da pesquisa 67
Figura 31 – Microestrutura do aço VTMPlus no estado recozido para 223 ± 3 HV0,5.....68
Figura 32 – Fresa de topo 70
Figura 33 – Broca canhão.....70
Figura 34 – Máquina-ferramenta.....73
Figura 35 – Corpo de prova (CP) utilizado nos ensaios 74
Figura 36 – Técnica de usinagem empregado nos ensaios.....75
Figura 37 – Fotografia do aparato montado para medição do desgaste de flanco da ferramenta de corte 76
Figura 38 – Medição da circularidade do furo 77
Figura 39 – Posição das medições de rugosidade 78
Figura 40 – Desgaste de flanco (VB) em relação comprimento usinado, das condições.....79
Figura 41 – Broca canhão, emulsão em abundância, material: VTMPlus - a) MEV na aresta externa da broca e detalhe do desgaste; b) EDS.....84
Figura 42 – Desvio médio da circularidade.....86
Figura 43 – Menores e maiores valores médios das circularidades de todos os ensaios.....87
Figura 44 – Comparação dos desvios de circularidade em relação avanço com velocidade de corte a) v_c = 60 m/min e b) v_c = 70 m/min 88
Figura 45 – Valores das rugosidades médias Ra de todos os ensaios. 91
Figura 46 – Menores e maiores valores médios das rugosidades médias Ra de todos os ensaios. 93
Figura 47 – Comparação das rugosidades Ra em relação avanço com velocidade de corte a) v_c = 60 m/min e b) vc = 70 m/min.....94
Figura 48 – Superfícies da parede do furo usinado no final da furação 96

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Aplicações de furação profunda 24
Tabela 2 – Comparação entre as características da furação convencional e furação profunda 26
Tabela 3 – Comparação dos processos de furação profunda 28
Tabela 4 – Parâmetros de corte na furação 38
Tabela 5 – Resumo sobre metal duro e seus revestimentos 50
Tabela 6 – Causas e soluções de desgaste de flanco na broca canhão 61
Tabela 7 – Resultados da análise semiquantitativa de EDS do aço VTMPlus 69
Tabela 8 – Composição química do Aço AISI H11 e H13 69
Tabela 9 – Condições de corte para realização do furo piloto 71
Tabela 10 – Condições de corte para furação profunda 72
Tabela 11 – As condições, composições e características do fluido de corte 72

Lista de Abreviaturas e Siglas

$VB_{máx}$	Largura máxima do desgaste de flanco	[mm]
CP	Corpo de Prova	
d	Diâmetro	[mm]
EDS	*Energy Dispersive Spectroscopy* - Espectroscopia por Energia Dispersiva	
f	Avanço	[mm/rev.]
f_z	Avanço por dente	[mm/dente]
GD	*Gun Drill* - brocas canhão	
HV	*Hardness Vickers* – Dureza Vickers	
ISO	International Organization for Standardization - Organização Internacional de Normalização	
l	Comprimento	[mm]
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura	
P	Pressão	[bar]
PVD	*Physical Vapor Deposition* - disposição física a vapor	
Q	Vazão	[l/min]
Ra	Rugosidade média	[µm]
rpm	Rotação por minuto	
TiAlN	Nitreto de titânio com alumínio	
VB	Largura do desgaste de flanco	[mm]
v_c	Velocidade de corte	[m/min]
l/d	Relação entre comprimento e diâmetro	
PCBN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino	

Sumário

1 INTRODUÇÃO 16

2 REVISÃO DA LITERATURA 19

2.1 Processo de furação 19

2.2 Furação profunda 23

2.2.1 Tipos de brocas empregadas na furação profunda 27

2.2.2 Máquinas usadas na furação profunda e estratégia do processo 33

2.2.3 Características da formação de cavaco na furação com broca canhão 35

2.3 Parâmetros de corte 37

2.4 Qualidade de processo de furação 40

2.4.1 Circularidade 41

2.4.2 Rugosidade 43

2.5 Materiais da ferramenta para furação 47

2.6 Fluidos de corte 52

2.7 Desgaste de ferramentas 57

2.7.1 Formas de desgaste na broca canhão 60

2.7.2 Medição do desgaste da ferramenta de corte 62

2.7.3 Critério para medição de desgaste de ferramenta de corte 63

2.8 Vida da ferramenta 64

3 MATERIAIS E MÉTODOS 65

3.1 Metodologia dos experimentos 65

3.2 Corpo de prova 68

3.3 Ferramentas de corte 69

3.4 Condições de usinagem 71

3.5 Fluido de corte 72

3.6 Máquina-ferramenta 73

3.7 Técnica de usinagem 74
3.8 Medição de desgaste e fim de vida da ferramenta de corte 75
3.9 Medição da circularidade 77
3.10 Medição da rugosidade 77
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 79
4.1 Desgaste da ferramenta de corte 79
4.2 Desvios de circularidade do furo 85
4.2.1 Menores e maiores valores médios dos desvios de circularidade de todos os ensaios 86
4.2.2 Efeito das condições de corte no desvio de circularidade 88
4.3 Rugosidade média (Ra) 90
4.3.1 Menores e maiores valores médios das rugosidades Ra de todos os ensaios. 92
4.3.2 Efeito das condições de corte na rugosidade 93
4.3.3 Superfície da parede do furo usinado 95
5 CONCLUSÕES 98
5.1 Desgaste da ferramenta 98
5.2 Desvio de Circularidade do furo 98
5.3 Rugosidade Ra 99
5.4 Propostas Para Pesquisas Futuras 100
REFERÊNCIAS 102
APÊNDICE A – Valores medidos dos desgastes da broca canhão, rugosidades e circularidades 112

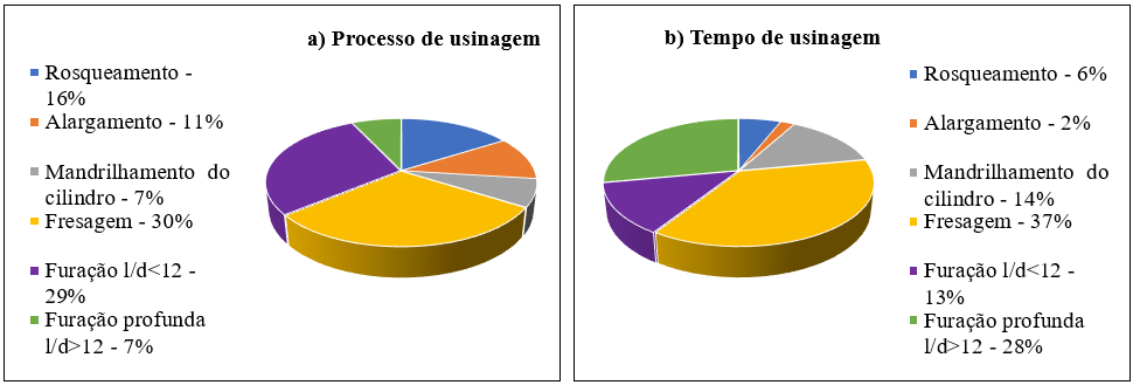
1 INTRODUÇÃO

A furação é tida como uma operação de usinagem complexa tanto quanto o torneamento e fresamento, devido às condições de usinagem rigorosas com relação à força axial, baixa saída de cavaco e entupimento dos canais com cavaco. Com o aumento de profundidade, o processo se torna mais difícil e complexo. Problemas como esses não só resultam em baixa qualidade do furo, mas também podem implicar na falha catastrófica da broca (Khan *et al.*, 2017). A maior parte das peças possuem pelo menos um furo. E a qualidade do furo no produto usinado é um detalhe que requer bastante atenção, visto que, o processo de furação é quase sempre a última operação e o furo é um pequeno detalhe de uma peça grande que deve ter passado por vários outros processos (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

De acordo com Sheth e George (2016), a necessidade básica de toda indústria é produzir com a melhor qualidade para um funcionamento adequado da peça. Em várias indústrias de produção, fatores como tolerâncias geométricas baixas (como circularidade), bom acabamento superficial (rugosidade baixa), desgaste da ferramenta, e elevada relação l/d (>10 caracterizando uma furação profunda) são identificados como desafios.

Além disso, a rugosidade e circularidade comprometidas podem inviabilizar o bom desempenho e afetar o aspecto da peça, implicando no risco dessa ser rejeitada. O que se torna grande prejuízo quanto ao custo, energia, tempo, desperdício de material, ferramenta de corte etc. A furação profunda é considerada um processo demorado por alguns autores, porém é notável o aumento da sua relevância. Segundo Abele *et al*. (2007) a furação ocupa cerca de 36% de todas as operações de usinagem, dentre as quais 7 % são consideradas furação profunda consumindo um tempo de usinagem de 28% em relação ao total , conforme a Figura 1a e Figura 1Figura b.

Figura 1 – Distribuição a) número de processos de usinagem e (b) tempo de usinagem completo



Fonte: Adaptado (Abele *et al.*, 2007)

Neste contexto, diante de vários desafios e poucos estudos relacionados ao assunto em questão percebe-se a necessidade de analisar a influência das condições de corte no desgaste, na rugosidade e circularidade na furação profunda do aço ferramenta VTMPLUS com broca canhão de metal duro revestida com TiAlN.

Este estudo é baseado em um problema real de uma empresa fabricante de matrizes de estampagem a quente a qual realiza furos profundos para refrigeração da peça metálica. A questão a ser respondida na pesquisa é: Qual é a condição de corte que pode elevar a produção sem muito prejudicar o desgaste da ferramenta de corte, desvio de circularidade e rugosidade?

O objetivo é contribuir com o estudo e a compreensão sobre a furação profunda, analisando os desgastes da broca canhão, os desvios de circularidade, as rugosidades sob influências das condições de corte, formular as conclusões que melhor satisfazem e propostas para estudos futuros. Nos processos de usinagem, uma seleção inadequada das condições de corte resultará em desgaste ou quebras de ferramentas, superfícies rugosas. Portanto, é necessário entender a relação entre os vários parâmetros controláveis e distinguir os parâmetros importantes que influenciam na qualidade do furo, no tempo de vida e qualidade da peça.

Segundo estudo realizado por Arunkumar *et al*. (2018) sobre otimização paramétrica de furação profunda, monitorando online a condição da ferramenta por meio de acelerômetro. Posteriormente, por Thanikasalam *et al*. (2019) sobre monitoramento online da condição da ferramenta e otimização de parâmetros de processo para integridade da superfície e qualidade do furo no processo de furação profunda. Os resultados encontrados, possibilitaram observar que a velocidade de fuso e

avanço influenciam no desgaste da ferramenta, na rugosidade e no desvio de circularidade. Além disso, segundo os mesmos a velocidade do fuso influencia mais na rugosidade e no desvio de circularidade em relação a avanço.

Neste sentido, parte-se da hipótese de que os fatores que mais influenciam na rugosidade e desvio de circularidade são a velocidade de corte, avanço e desgaste da ferramenta de corte.

Assim, para viabilizar o teste da hipótese será realizada uma pesquisa experimental que tem por finalidade avaliar cada um destes fatores. E a pesquisa bibliográfica visa explorar os materiais elaborados já publicados sobre assunto em questão que fornecem bases ao fundamento teórico e a pesquisa experimental (Gil, 2002; Severino, 2014).

Esta dissertação será apresentada do seguinte modo: Além deste Capítulo introdutório, neste presente trabalho existem mais outros 4 capítulos. No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura onde o trabalho é embasado, assim como os recursos teóricos necessários para o leitor tais como: processo de furação, furação profunda, parâmetros de corte, qualidade de processo de furação, materiais da ferramenta para furação, fluídos de corte, desgaste de ferramentas, e vida da ferramenta. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados para realização dos ensaios. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e as discussões deles. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e propostas para estudos futuros, em seguida as referências bibliográficas utilizado no trabalho. O anexo é exposto para comprovar algumas informações adicionais, mencionadas no texto.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo de furação

A furação é um dos processos de usinagem com grande variedade, utilizado para realizar furos que são produzidos com auxílio de uma ferramenta de corte com uma ou várias arestas de corte, que removem o material da superfície da peça de trabalho. Além disso, é um dos mais complicados e muitos fatores em torno do processo prejudicam a qualidade da superfície usinada (Abele *et al.*, 2007; Siddiquee *et al.*, 2014).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), a maior parte das peças produzidas nas indústrias contém no mínimo um furo e somente uma parte muito reduzida trazem consigo furos realizados em processos anteriores (fundição, forjamento etc.) que preparam a peça de trabalho.

A ferramenta mais usada neste processo de usinagem é a broca helicoidal de aço-rápido que vem sendo melhorada no decorrer dos tempos. O principal motivo para a grande utilização da mesma está a associado ao diâmetro do furo que se vai realizar. Uma ferramenta de metal duro exige maiores rotações em relação a uma ferramenta de aço-rápido para um mesmo diâmetro, o que por vezes é muito elevada para várias máquinas comumente utilizadas, conforme König e Klocke (1997 *apud* Bordin, 2013; Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

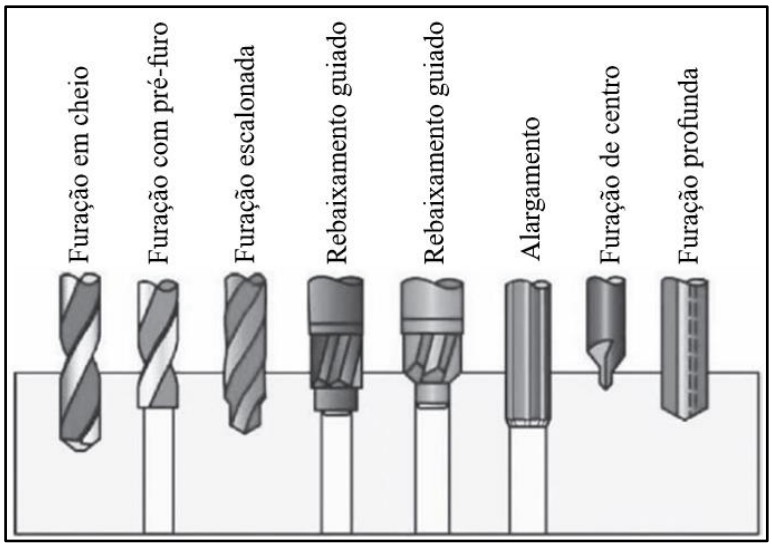
Conforme a norma Alemã DIN 8589/2003, a definição da furação é dada como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal (Silveira e Rezende, 2020). Segundo a norma Brasileira ABNT NBR 6175/2015 a furação é definida como processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo geralmente cilíndrico em uma peça, com o auxílio de uma ferramenta comumente multicortante.

A furação apresenta algumas características particulares que a transformam num processo singular que dificultam por vezes o seu entendimento e efeitos com relação ao sistema peça/ferramenta/máquina-operatriz, de acordo com König e Klocke (1997 *apud* Bordin, 2013; Castillo, 2005; Trent e Wright, 2000) que são:

- A velocidade de corte não é constante ao longo da aresta, varia de um valor mínimo (zero) no centro até máximo na sua extremidade;
- Não é fácil observar o processo de formação de cavaco;
- Complicações na evacuação de cavaco para fora do furo;
- Dificuldade do fluido de corte alcançar a região de corte e aresta de corte da ferramenta, e assim agir como lubrificante, refrigerante e solução para evacuação de cavacos nesta região;
- Distribuição inadequada de calor na zona de corte;
- Grande desgaste nos cantos de ferramentas;
- Atrito das guias na parede do furo.

Existem várias operações de furação, as comumente utilizadas podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2– Algumas operações de furação



Fonte: (Astakhov, 2011a)

As operações podem ser divididas em 3 grupos (Ferraresi, 1970):

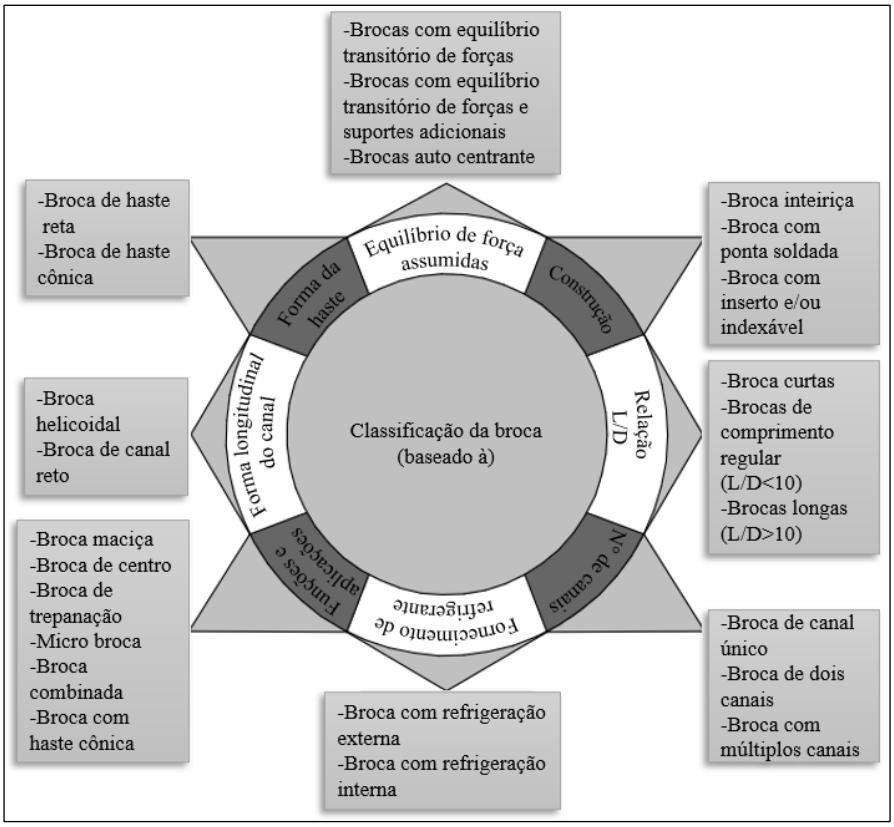
- Furação – furação em cheio, furação com pré-furo, furação escalonada, furação de centros, furação profunda em cheio, trepanação;
- Rebaixamento – rebaixamento guiado e não guiado;
- Alargamento – alargamento cilíndrico de (desbaste e acabamento), alargamento cônico de (desbaste e acabamento).

A furação é, na maioria das vezes, a última operação de usinagem na produção de peças. As grandes exigências com relação à segurança do processo são, no entanto,

postos nesta operação visto que a peça de trabalho já teria sofrido várias operações anteriores, caracterizando um alto valor agregado (custo de cada operação, tempo, energia, material etc.) (Tönshoff *et al.*, 1994).

Diversos tipos de brocas são utilizados nas indústrias para produzir furos tendo levando-se em conta aspectos como: diâmetro do furo, profundidade, tolerâncias de formas, medidas e volume de produção. As brocas podem ser classificadas conforme a Figura 3.

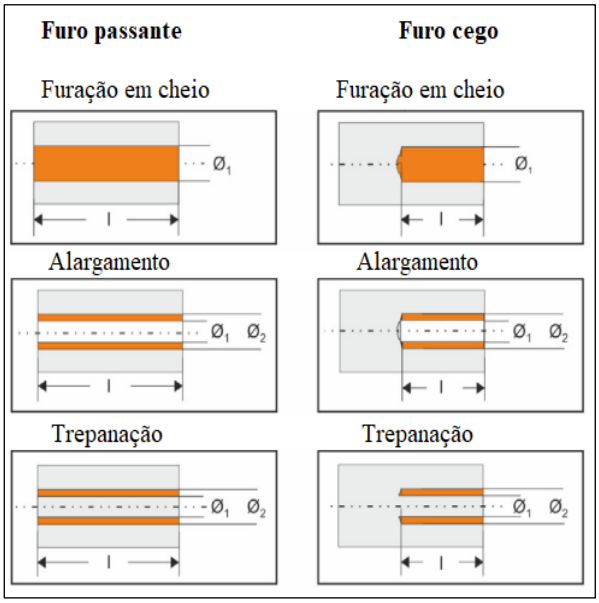
Figura 3 – Classificação da broca de modo geral



Fonte: Adaptado (Astakhov, 2011a)

A furação traz consigo métodos variados para realização de furos que podem ser passantes ou cegos. A Figura 4 apresenta os diversos métodos do processo de furação.

Figura 4 – Métodos do processo de furação



Fonte: adaptada (VDI 3210, 2006 *Apud* Biermann *et al*., 2018)

Furação em cheio é o método mais utilizado, onde a usinagem do furo é realizada em materiais sólidos. Alargamento é usualmente aplicado para se obter maior acabamento superficial e melhor tolerância de furo pré-usinado em peças que saem do processo de fabricação como: forjamento, fundição, prensagem, ou ainda extrusão. Além disso, também é aplicado em casos em que não é possível utilizar o método de furação em cheio devido à baixa potência da máquina – ferramenta. Logo, emprega-se primeiro o método de furação em cheio com diâmetro menor, posteriormente o método de alargamento até alcançar o diâmetro real. Na trepanação não é necessário uma furação prévia, a ferramenta realiza furo conservando a parte interna (núcleo) inteiriço sem transformá-la em cavacos. É importante em caso de potências limitadas da máquina-ferramenta. A potência demandada na trepanação é menor comparativamente a furação em cheio. O núcleo formado na trepanação pode ser aproveitado em situações em que a peça é grande ou cara, ou ainda para outros fins. Na trepanação é preciso ter em conta de que, em furos não passante tem de ser empregado ferramenta especial para extração do núcleo (Sandvik, 2003).

Segundo Barrios *et al*. (2011) para execução da furação é necessário levar em consideração os seguintes requisitos:

- máquinas-operatriz – maior rigidez e estabilidade dinâmica;

- fluido – precisa de alta pressão para remoção de cavaco e refrigeração da aresta cortante;
- brocas - para relações l/d maiores são exigidas brocas especiais.

Os fatores limitantes da furação profunda são: usinabilidade do material da peça, estabilidade da ferramenta e da máquina, precisão da máquina – operatriz, composição do fluido de corte e o material da ferramenta (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011).

2.2 Furação profunda

A furação profunda é o processo de furação empregado para realizar ou alargar furos, na qual a relação entre o comprimento e diâmetro é superior à 10. Este processo pode ser reconhecido pela grande taxa de remoção de material e por possuir uma boa retilineidade do furo, tolerância dimensional e acabamento superficial. Entre os tipos de usinagem de superfície existente, a usinagem de furos profundos é a operação tecnológica mais complexa e longa, tanto a respeito de condições de processamento quanto da máquina especial requerida para sua execução. Dentre as condições inadequadas para a formação de cavacos pode-se citar, problema de extraí-los do canal de furo, a baixa rigidez do projeto da ferramenta de corte usada, a incapacidade de observar a ferramenta ao longo da operação. Todos esses empecilhos tornam a operação para realização de furos profundos bastante complicada, e geram grandes dificuldades para assegurar a produtividade requisitada e baixar o custo por peça. Devido a isso, o estudo da furação profunda é de extrema importância, trabalhos recentes têm trazido resultados positivos e aumentado consideravelmente a produtividade desta operação (Biermann *et al.*, 2018; Smith, 2008).

Há algumas técnicas que vêm sendo usadas para realização de furos profundos, cada uma com sua aplicação adequada para um método definido de geração de furos. Um dos grupos específicos de ferramentas de furação profunda é auto centrante, na qual as forças de corte geradas são equilibradas, não relativamente às arestas de corte, como é o caso das brocas helicoidais, mas sem variação devido as guias posicionadas a 90° e 180° com relação à aresta de corte. Essas guias friccionam com a superfície do furo que

está sendo gerado e, assim sendo, apoiam a ponta, enquanto se desenvolve à superfície. As máquinas – operatrizes empregadas para este tipo de furação podem ser caras, ou então pode se utilizar máquinas convencionais ou/e centros de usinagem adaptados, para redução do custo de produção. Assim sendo, os processos de furação profunda, que muito se distinguem dos processos de furação convencionais, são importantes para diversas aplicações onde são necessários furos com altas relações entre comprimento-diâmetro e excelente qualidades, conforme mostra a Tabela 1 (Biermann *et al.*, 2018; Sandvik, 2003; Smith, 2008).

Tabela 1 – Aplicações de furação profunda

Nº	**Indústria**	**Aplicação**
1	Petróleo e gás	Colares de perfuração, tubos de perfuração, bombas submersíveis
2	Construção Naval	Eixos de Rotor
3	Médica	Haste intramedulares, parafusos ósseos, *stents* (ou estentes) agulhas de seringa
4	Automóvel	Bicos injetores, trilhos de combustível, pinos de pistão, passagens de óleo de eixo de comando e virabrequim, trocador de calor
5	Aeroespacial	Trem de pouso, eixos de turbina e tubos de reabastecimento
6	Mecânica em geral e outros setores	Moldes, matrizes, produção de aços, usinas, e etc

Fonte: adaptada (Biermann *et al.*, 2018; Chandar, Nagarajan e Kumar, 2021; Kirschner *et al.*, 2018)

As demandas são grandes com relação à qualidade, dimensões e tolerâncias de forma. As ferramentas empregadas na furação profunda, são desenvolvidas para atenderem essas demandas e geram qualidades que são requeridas até mesmo na furação curta.

Muitas vezes, este processo era descrito pelos diversos autores com diferentes formulações, baseando-se nas suas próprias pesquisas e nos requisitos que havia no momento. De acordo com Smith (2008), o nome furação profunda significa usinagem

de furos de longas profundidades relativamente ao seu diâmetro (l/d). Atualmente, são utilizadas várias formas para definir este processo, assim sendo, a furação profunda:

- é o processo de furação empregado para realizar ou alargar furos, na qual a relação entre a profundidade (l) e o diâmetro é superior a 3 (l/d > 3 ou l > 3xd) (Biermann *et al.*, 2018; Troitskiy, 1971);

- é o processo de furação empregado para realizar ou alargar furos, na qual a relação entre a profundidade (l) e o diâmetro é superior a 5 (l/d > 5 ou l > 5xd) (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Khan *et al.*, 2017; Raj *et al.*, 2014; Smith, 2008; Troitskiy, 1971; Xie *et al.*, 2022);

- é o processo de furação empregado para realizar ou alargar furos, na qual a relação entre a profundidade (l) e o diâmetro é superior a 10 (l/d > 10 ou l>10xd) (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Biermann *et al.*, 2018; Khan *et al.*, 2017; Sandvik, 2003).

Existe uma explicação por trás de todas essas definições. Segundo Troitskiy (1971) e Zabel (2014), o processo de furação profunda em que a relação l/d > 3 é a definição utilizada no campo da tecnologia de usinagem e/ou quando há baixa taxa de remoção de cavacos, ao passo que o processo de furação profunda em que a relação l/d > 10 é a definição comumente empregado na indústria. Ademais, (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Chandar, Nagarajan e Kumar, 2021; Xie *et al.*, 2022) relatam que na indústria a relação l/d > 5 ou pouco menor que 8 já tem sido apontado como furação profunda.

Há algumas características que diferenciam a furação profunda da furação curta que são: princípio de furação, o design da ferramenta e a qualidade do furo alcançável (Biermann *et al.*, 2018). E a Tabela 2 apresentada de forma ampla, algumas características comparativas entre os dois tipos de furação, de acordo com Biermann *et al.* (2018).

Tabela 2 – Comparação entre as características da furação convencional e furação profunda

Métodos de furação convencionais	**Métodos clássicos de furação profunda**
Usando ferramentas de furação helicoidal:	Usando ferramentas de furação profunda:
* Fácil e barato	*Investimento em equipamentos especiais
* Assistência mecânica para remoção de cavacos	*Sem assistência mecânica para remoção de cavacos
Design simétrico de ponta:	Design assimétrico de ponta:
* Maior taxa de avanço por rotação	* Menor taxa de avanço por rotação
_* Equilíbrio de forças	_* Desequilíbrio de forças
_** Desvio de diâmetro maior	_** Desvio do diâmetro menor
_** Qualidade de superfície inferior	_** Qualidade de superfície superior
_** Maior desvio de retidão	_** Menor desvio de retidão
Fornecimento de refrigerante (baixa taxa de fluxo):	Fornecimento de refrigerante (alta taxa de fluxo):
* Remoção de cavaco frequentemente necessária	* Remoção contínua de cavacos
-	* Bom resfriamento e lubrificação

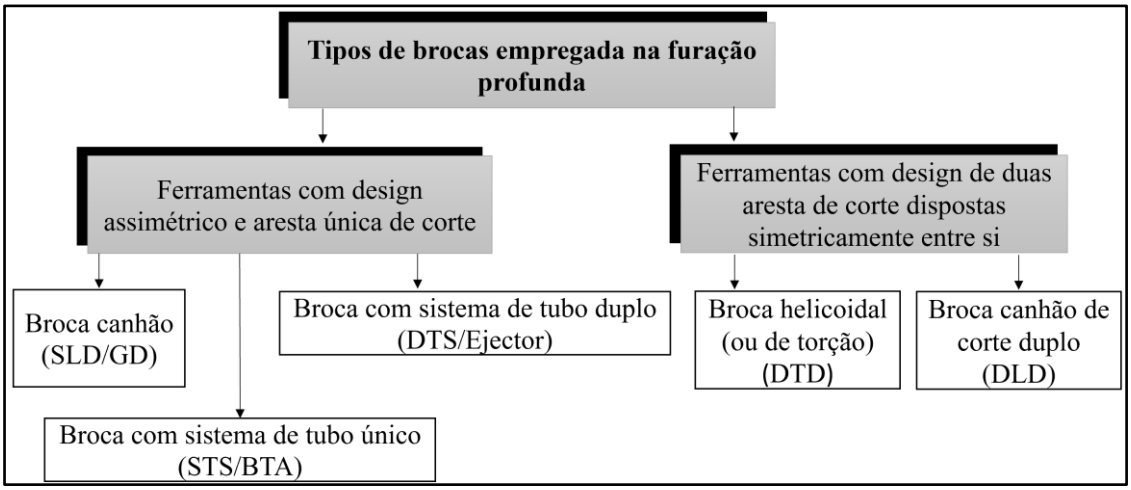
Fonte: Adaptado (Biermann *et al.*, 2018)

Por conseguinte, o processo de usinagem de furo em que a faixa de profundidade em relação ao diâmetro é grande pode ser considerado como uma furação profunda. Ao passo que, em uma furação convencional (curta) há pouca probabilidade de se atingir uma profundidade que é cinco vezes maior do que o seu diâmetro. Um dos principais problemas do uso da furação profunda é a evacuação de cavacos, porque quanto mais longo for o furo, mais longo o trajeto que o cavaco tem que percorrer, da aresta de corte até a saída do furo. Além do mais, os problemas associados à aresta postiça de corte (APC) influenciam negativamente a quebra de cavacos. O controle do fluido refrigerante e sua utilização operacional são fundamentais em qualquer técnica de furação profunda, visto que um dos seus papéis primordiais é de lubrificar/resfriar a aresta de corte e evacuar cavacos. Além disso, se houver atrito acumulado por causa da pouca alimentação de fluido de corte, pode ocorrer efeito de torção muito alta e apertar a broca no furo (Sandvik, 2003; Smith, 2008).

2.2.1 Tipos de brocas empregadas na furação profunda

Como mostra a Figura 5, baseando-se em processos mecânicos, são utilizados dois *designs* distintos de ferramentas de corte: ferramentas com *design* assimétrico de aresta de corte única nomeada broca canhão, broca com sistema de tubo único e broca com sistema de tubo duplo. Por outro lado, existem ferramentas com *design* de duas arestas de corte dispostas simetricamente entre si, como por exemplo broca helicoidal e broca canhão de canais retos (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Biermann *et al.*, 2018).

Figura 5 – Tipos de brocas para furação profunda



Fontes: Adaptada (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Biermann *et al.*, 2018; Chandar, Nagarajan e Kumar, 2021; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014)

Onde: SLD – sigla inglesa para palavra "*single-lip drill*" conhecida em português como broca canhão ou broca de aresta de corte única, ou também *Gundrill (GD)* em inglês; STS – sigla inglesa para palavra "*single-tube system*" conhecida em português como sistema de tubo único ou ainda como BTA – sigla inglesa para palavra "*Boring and Trepanning Association*"; DTS– sigla inglesa para palavra "*double-tube system*" conhecida em português como sistema de tubo duplo ou ainda ejector; DLD – sigla inglesa para palavra "*double-lip drill*" conhecida em português como broca canhão de corte duplo; DTD – sigla inglesa para palavra "*Deep Twist Drilling*" conhecida em português como broca helicoidal de furação profunda.

As ferramentas mencionadas na Figura 5 podem apresentar cabeças soldadas, insertos e guias (parafusadas ou soldadas). Também dão origem aos sistemas de furação profunda como: sistema de furação com broca canhão (SLD); sistema de tubos duplo (DST/Ejector), sistema de tubo único (STS/BTA), que são capazes de realizar furo com bom acabamento, tolerâncias dimensionais estreitas e boa concentricidade.

A comparação dos processos de furação profunda com brocas de *design* assimétrico pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação dos processos de furação profunda

Furação profunda (assimétrica)	**Diâmetro de furação (mm)**	**Facilidade de execução**	**Produtividade**	**Furação Relação l/d**	**Tolerância do furo**	**Rugosidade do furo (µm)**
Canhão/SLD	0,9 - 41	+++	+	100	IT9	0,1 -3,2
Ejector/DTS	18 – 185	++	+++	100	IT9 e IT10	1 - 3
BTA/STS	15 – 280	++	+++	150	IT9 e IT10	1 – 3
Descrição	+ baixa	++ média	+++ alta			

Fonte: Adaptado (Biermann *et al.*, 2018; Sandvik, 2003; Tungaloy, 2020)

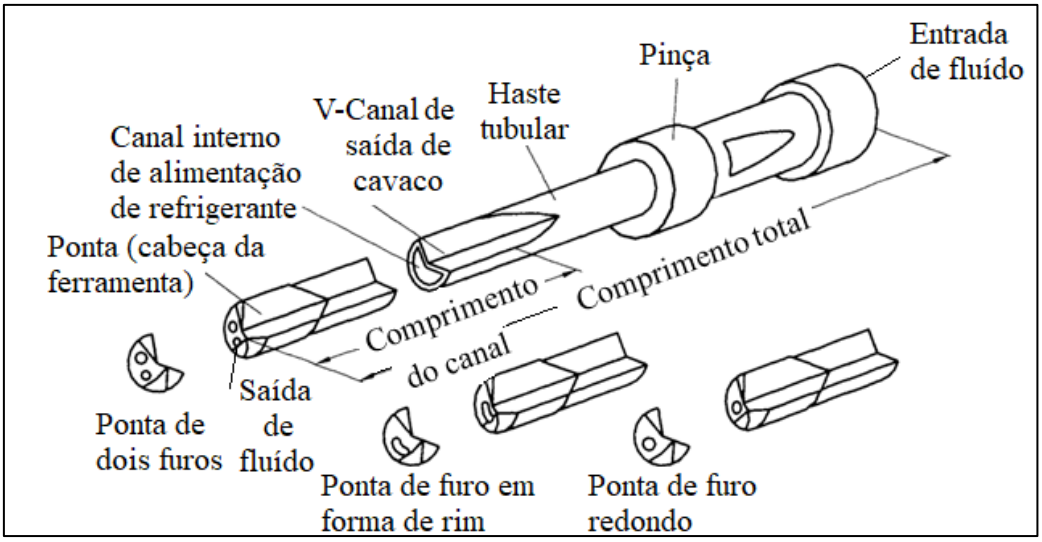
A furação profunda (simétrica) com broca canhão de corte duplo e broca helicoidal são limitadas nas relações entre comprimento-diâmetro a serem realizados (Biermann e Kirschner, 2015).

As primeiras ferramentas designadas para o processo de furação profunda são conhecidas como brocas canhão, que foram originalmente desenvolvidas há mais de 100 anos, verificando a sua frequente aplicação no setor da defesa. Até o presente, as brocas canhão têm sido largamente usadas na indústria automotiva para execução de furos nos blocos de motor, elementos de transmissão, árvore de cames etc. (Jung e Ni, 2003; Lacalle, De *et al.*, 2011).

A broca canhão também conhecida como broca de aresta única com a sigla inglesa "SLD" é composta por três partes: cabeça da broca, haste da ferramenta (ou corpo da broca) e a pinça (ou haste de fixação). É destinada para realizar furo na faixa de diâmetro de 0,5 até 80 mm. Esta broca fornece o fluido em alta pressão da haste até a região de corte por intermédio de furo interno ao longo da ferramenta. E a evacuação de

cavaco é realizada a partir de um canal de saída em forma de V, conforme a Figura 6 (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Biermann *et al.*, 2018; Sandvik, 2003).

Figura 6 – Broca canhão e seus componentes



Fonte: (Astakhov, 2006; Li *et al.*, 2019)

O canal de saída de cavaco em forma de V é a parte da broca que permite a saída da mistura de cavaco (que devem ser muito bem quebrados) e fluido de corte durante a furação. Este canal é implementado durante a fabricação dos *blanks* (material bruto) por meio de extrusão com ângulo de 110-130º (Biermann *et al.*, 2018).

A saída de fluido ou canais de resfriamento é parte da broca canhão dentro do corpo da ferramenta que tem como objetivo fornecer o fluido de corte pressurizada de 10 à 50 bar, por causa do difícil acesso do fluido na região de corte, ponta da ferramenta e da evacuação correta dos cavacos (Biermann *et al.*, 2018; Lacalle, De *et al.*, 2011).

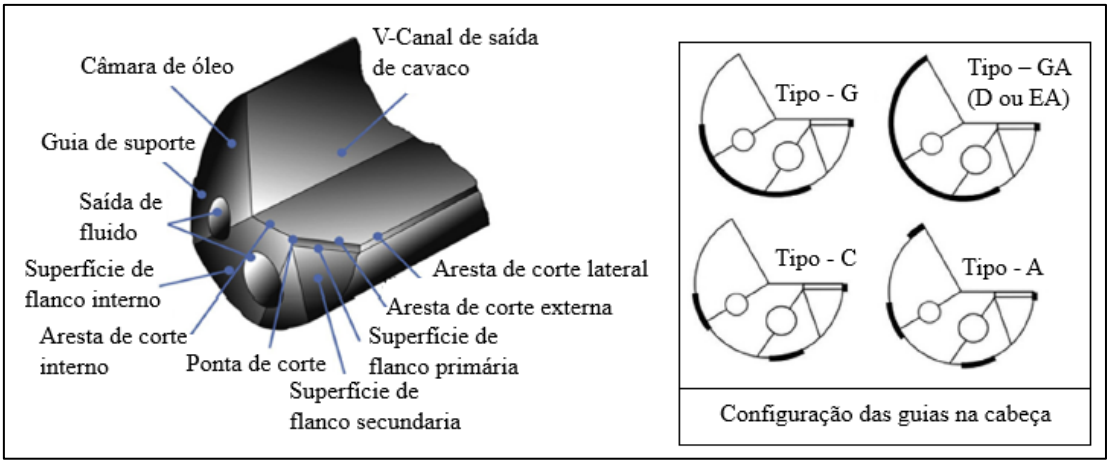
A pinça (*driver* ou haste de fixação) é a parte da broca responsável pela fixação da ferramenta de corte e a transmissão do torque de furação (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Sandvik, 2003).

O design excêntrico das arestas de cortes é a parte da broca que fornece um melhor acabamento devido o atrito gerado com a superfície usinada (Lacalle, De *et al.*, 2011).

A cabeça da broca canhão é produzida de metal duro e geralmente soldada na haste da ferramenta (que é de aço ferramenta). Nela podem ser adicionadas insertos e guias intercambiáveis unida por meio de solda ou parafuso (Biermann *et al.*, 2018). A

Figura 7 apresenta detalhadamente a geometria da cabeça da broca canhão e suas respectivas partes.

Figura 7 – A geometria da cabeça da broca canhão e suas partes

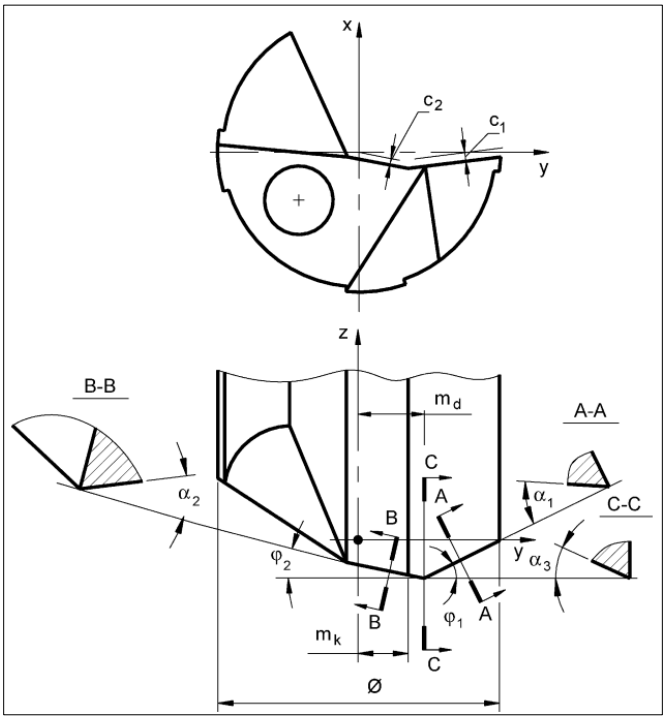


Fontes: adaptado (Chaudhari, Sankaranarayanasamy e Kumar, 2022)

A Figura 7, no lado direito, apresenta algumas formas (externos) padronizadas de brocas canhão de acordo com a norma VDI3208. A forma G é classificada como forma padrão por causa da sua grande empregabilidade. Apropriado para grande parte dos materiais e trabalho de furação. O formato C possui uma boa orientação, esta forma é recomendada onde as tolerâncias de furação são apertadas em relação ao diâmetro do furo e qualidade da superfície. O formato D (ou EA) é recomendado para materiais com boa lubrificação. O formato A é recomendado para as condições em que a furação é desfavorável, em casos por exemplo, de furos interrompidos, superfícies inclinadas e cruzadas, onde a ação do fluido lubrificante é ruim (Biermann *et al.*, 2018; Guhring, 2020).

A construção completa da cabeça da broca canhão pode ser observado na Figura 8. O eixo Z é o eixo da broca canhão e aponta para a ponta da ferramenta de corte. O plano XY é perpendicular ao eixo Z estendido do interior para o exterior. E os eixos X, Y, e Z seguem sistema de coordenadas e regra da mão direita que identificam os eixos (Wang, Jia e Zhang, 2014).

Figura 8 – Construção da cabeça e ângulos da broca canhão



Fontes: (Astakhov, 2006; Astakhov e Galitsky, 2005; Jung e Ni, 2003; Liang *et al.*, 2022; Wang, Jia e Zhang, 2014)

A Figura 8 também apresenta diversos parâmetros geométricos que constituem a ponta de uma broca canhão que devem ser levados em conta quando a broca for afiada:

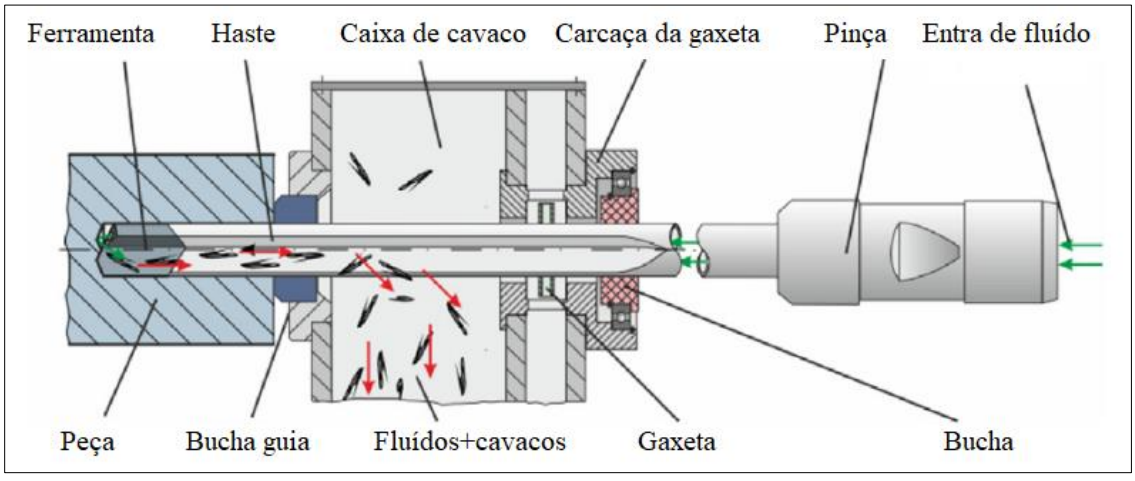
Onde: φ_1: ângulo de posição complementar da aresta externa; φ_2: ângulo de posição complementar da aresta interna; α_1: ângulo de folga normal da aresta externa; α_2: ângulo de folga normal da aresta interna; α_3: ângulo de folga secundário; m_d: distância no eixo x do ponto de furação em relação a centro de coordenadas da ferramenta; c_1: distância no eixo y da aresta de entrada em relação a centro de coordenadas da ferramenta; c_2: distância no eixo y da aresta de saída em relação a centro de coordenadas da ferramenta; Ø: diâmetro da ferramenta.

Segundo De Lacalle *et al*. (2011) e Biermann *et al*. (2018) a broca canhão de haste longa tem uma rigidez muito inferior em relação a broca helicoidal para furação profunda simétrica, por causa do canal de saída de cavaco ao lado, e deve ser suportada por um mecanismo que impede qualquer deflexão por toda extensão da ferramenta e desvio de retilineidade, isto é, em casos em que as relações l/d > 30-50.

A furação com broca canhão necessita de máquinas dedicadas, em casos de máquinas não dedicadas é necessário realizar um pré-furo com dimensões controladas com relação ao diâmetro da broca que será empregada (Biermann *et al.*, 2018).

A furação profunda com broca canhão é comumente utilizada no intervalo de diâmetro de 0,5 a 80 mm com intuito de gerar furos com relações entre comprimento-diâmetro (l/d) até 900 e a qualidade até IT9. Na Figura 9 se observa que este sistema de furação utiliza o princípio mais antigo para alimentação de fluido de corte. Ao longo da furação, o fluido de corte é alimentado por meio de um ou mais furos que passam pela haste da ferramenta e jogam a refrigeração na aresta de corte e mistura com cavaco. A mistura de cavaco e fluido de corte é extraído através de canal externo da broca em forma de V, onde a pressão do fluido impulsiona a saída do cavaco (logo é necessário refrigeração em alta pressão, principalmente em broca canhão de pequeno diâmetro). Por causa do canal em forma de V, a seção transversal do tubo abrange 3/4 de sua circunferência (para brocas de diâmetro menor que 1 mm a seção transversal para os canais de alimentação do fluido de corte, não desempenham a sua função por causa do seu tamanho muito pequeno). O acabamento do furo pode ser comprometido, quando o cavaco entra em contato com a superfície usinada, ou seja, a parede do furo (Biermann *et al.*, 2018; Biermann e Kirschner, 2015; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Sandvik, 2003).

Figura 9 – Princípio esquemático do processo de furação com broca canhão



Fontes: (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Frink, 1977 *apud* Biermann *et al.*, 2018)

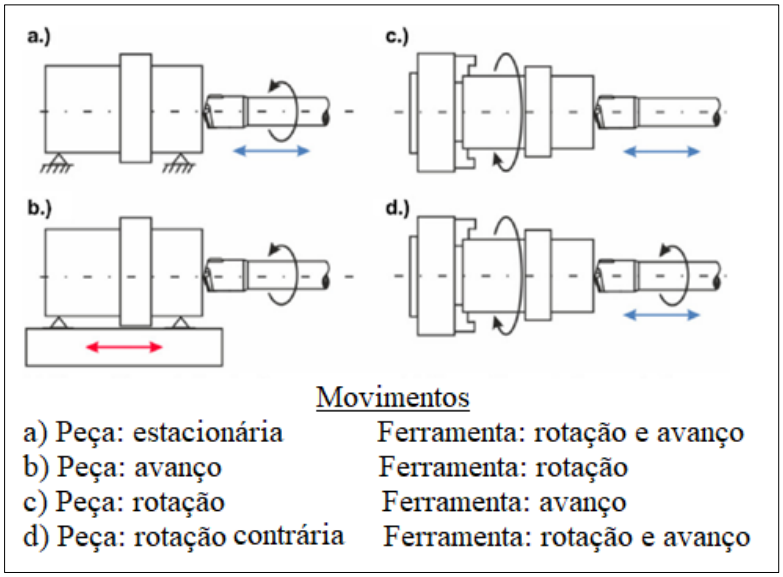
A produção de cavacos longos é desvantajosa, porque pode causar risco de entupimento de cavacos no canal, quebra inesperada da ferramenta e marcas na parede do furo. Além da geometria da ponta, uma formação desejável de cavacos deriva

especialmente da velocidade de corte e do avanço. A furação canhão pode realizar furos inferiores ao STS (sistema de tubo único) (Buck, 1971 *apud* Biermann *et al*., 2018; Sandvik, 2003).

2.2.2 Máquinas usadas na furação profunda e estratégia do processo

Devido às especificidades da furação profunda e métodos associados, nas linhas de produção são empregadas máquinas especiais que atendem às demandas de estabilidade, precisão e possuem os sistemas de alimentação de fluido sob alta pressão. A Figura 10 mostra os quatro principais esquemas de modos de operação para realização de furo profundo.

Figura 10 – Modos de operação das máquinas



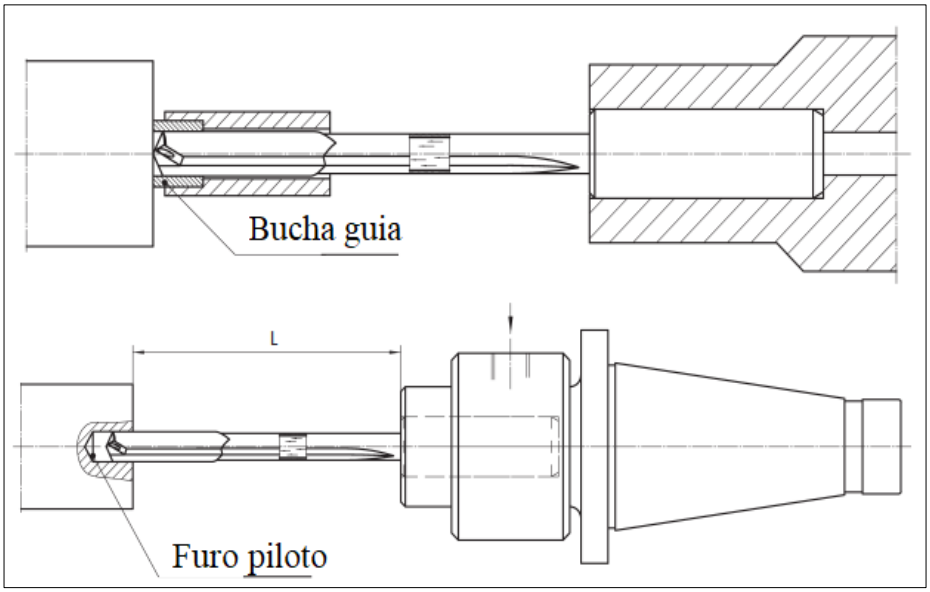
Fontes: Adaptada (VDI 3210 *apud* Biermann *et al*., 2018; Gorelova e Kristal, 2015)

Nos esquemas das máquinas para os modos de operação, é perceptível as possíveis combinações de movimento de rotação e avanço que podem ser realizadas pela ferramenta de corte, peça ou ambas. Os modos de operação tipo a) e b) são empregados para usinagem de grandes variedades de peças que não podem realizar movimento de rotação na máquina. Nesta situação é comum a utilização de furação com broca canhão e uso de centros de usinagem (ou convencionais modificadas). Tipo c) é

normalmente empregado em situações em que a peça possui um furo no eixo de rotação (um pouco de desbalanceamento da peça em rotação pode originar resultados indesejáveis), é comumente utilizado na furação profunda BTA/STS e produção em massa. O desvio de retilineidade deste modo de operação é menor em relação ao caso em que a ferramenta realiza movimento de rotação. O tipo d) é normalmente empregado na realização de furos com eixo de simetria, possui menor desvio e é utilizado com frequência para peças pesadas ou muito compridas (Biermann *et al.*, 2018; Castillo, 2005; Sandvik, 2003).

Por causa do design assimétrico da broca, e situações de processo instáveis na fase inicial de furação, as brocas de furação profunda exigem um elemento guia no princípio do processo para orientar a ferramenta ao longo da furação. Essa orientação normalmente é efetuada através de uma bucha guia (bucha de furação), ou um furo piloto (furo pré-usinado), como mostra a Figura 11 (Biermann *et al.*, 2018).

Figura 11 – Furação com bucha guia ou furo piloto



Fontes: (Botek, 2015)

A bucha de furação é utilizada em máquinas dedicadas de furação profunda. Para realização de furos com diâmetros grandes a bucha é temperada e retificada, e para diâmetro pequeno é inteiriça de metal duro. O alinhamento entre a bucha guia e o fuso da máquina não pode ser superior à 0,02 mm, folga (ou distância) entre a bucha e a peça deve ser de até 0, 01 mm ou 1 mm (em caso de furação com broca Ejector). Os furos pilotos são utilizados geralmente em centros de usinagem, e a tolerância de furo piloto é superior em relação ao diâmetro da broca de até 0,01 a 0,02 mm (na furação com broca

canhão) e 0,05 mm (para Ejector). É preciso atender esses requisitos para se alcançar resultados de fabricação geométrica com maior precisão e pouco desgaste da ferramenta (Biermann *et al.*, 2018; Sandvik, 2003; Tungaloy, 2020).

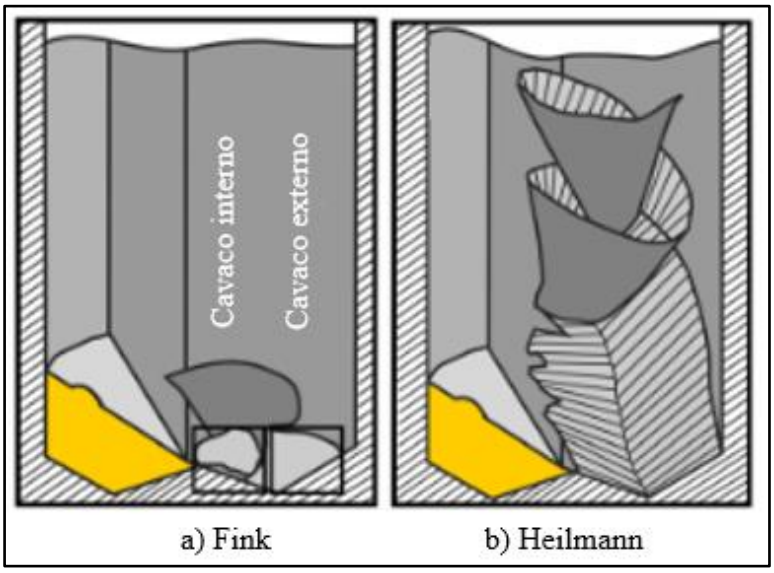
2.2.3 Características da formação de cavaco na furação com broca canhão

A formação de cavaco na furação é um aspecto que se deve levar em consideração e requer também especial atenção. Comparando a broca com as outras ferramentas, ela atua em condições muito difíceis, pois ao longo da furação é difícil remover o cavaco, observar a formação de cavaco, e fornecer refrigerante na região de corte.

Segundo Kirschner *et al*. (2018) há possibilidade de se adequar a formação de cavaco de acordo com o tipo de material, ao se escolher velocidade de corte e taxa de avanço apropriados, e as várias formas da cabeça da broca.

Para furação profunda com broca canhão são apresentadas duas teorias de formação de cavaco formuladas por Fink e Heilmann. Segundo Fink, dois cavacos separados com curvaturas diferentes são formados na aresta de corte interna e externa. Os cavacos se cruzam e levam aos cavacos torcidos e dobrados que são típicos para furação profunda com broca canhão, Figura 12a. De acordo com Heilmann os cavacos são formados em ambas as arestas por causa do movimento de escoamento em direções opostas. Neste âmbito, o cavaco mais rápido formado pela aresta de corte externa rompe o cavaco mais lento formado pela aresta de corte interna e isso resulta em dois cavacos, Figura 12b. Ao sobrepor o movimento de avanço com uma oscilação axial, uma quebra de cavacos pode ser forçada. A oscilação pode ser gerada mecanicamente por um pulsador axial ou por meio de atuadores piezoelétricos (Kirschner *et al.*, 2018; Zabel e Heilmann, 2012).

Figura 12 – teorias de formação de cavacos formuladas – a) Fink b) Heilmann



Fontes: Adaptada (Kirschner *et al.*, 2018; Zabel e Heilmann, 2012)

A má formação do cavaco pode trazer grandes dificuldades no tocante à retirada de cavaco de dentro do furo, entupimento, crescimento do momento torsor necessário e como resultado a quebra da ferramenta. Essa quebra traz consigo desvantagens como: descarte da ferramenta, trabalho dispendioso e longo, danos à qualidade do furo, e a peça pode ser recusada (o que seria uma perda considerável, visto que, o furo na peça pode ser só um detalhe muito pequeno de uma peça bastante grande) (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Kirschner *et al.*, 2018; Vinnikov e Frenkel, 1971).

De acordo com Ke *et al*. (2005), a forma do cavaco é a razão fundamental para a suavidade de um processo de furação. O processo de furação será brando se os cavacos forem bastante quebrados. Porém, a maior parte dos materiais dúcteis não quebram ao longo da furação, consequentemente, formam cavacos contínuos.

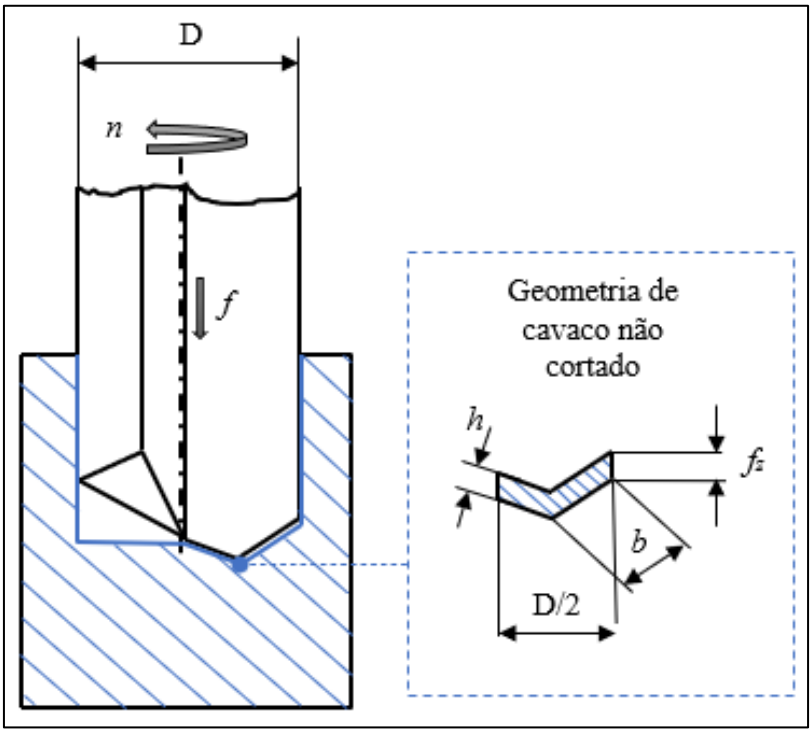
As características dos cavacos podem ser classificadas quanto ao tipo, a forma e tamanho. Quanto ao tipo os cavacos podem ser: contínuos, de ruptura e cisalhados. Quanto à forma os cavacos podem ser: em fita, espiral, helicoidal e lasca. Quanto ao tamanho os cavacos podem ser: longos e curtos (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; ISO 3685, 1993).

2.3 Parâmetros de corte

Os parâmetros (ou condições) de corte no processo de furação são aqueles que têm de ser regulados na máquina, de forma direta ou indireta, para a retirada do cavaco. Pois, a escolha delas na furação tem de levar em conta primeiramente a quebra adequada de cavaco. A velocidade de corte e avanço são os parâmetros fundamentais que compõem o processo de furação (Astakhov, 2011a; Castillo, 2005; Sandvik, 2003).

Os parâmetros de corte são: avanço (*f*), profundidade de corte (a_p), velocidade de corte (v_c), rotação por minuto da peça ou ferramenta (*n*), largura de usinagem (b), espessura de usinagem (h) e etc, na Figura 13 é possível observar alguns parâmetros.

Figura 13 – Parâmetros de furação: (a) furação em cheio e (b) furação com pré-furo



Fonte: Adaptado (Astakhov, 2014; Zhang *et al.*, 2018)

A Tabela 4 apresenta as equações empregada para determinar os parâmetros de corte de furação.

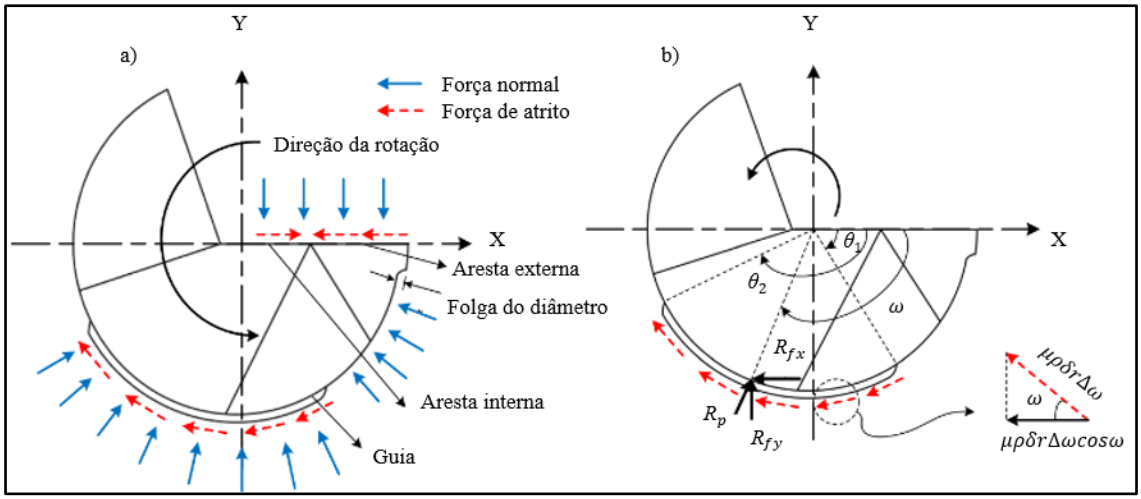
Tabela 4 – Parâmetros de corte na furação

Parâmetro de corte	**Equação**	**-**
Velocidade de corte	$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \text{mm/min}$	π =3,14 D – Diâmetro da broca, mm n – número de rotação por minuto, rpm ou rev./min (ferramenta ou peça)
Velocidade de corte para qualquer ponto "*i*" da aresta de corte	$v_i = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{1000}, \text{mm/min}$	D_i – Diâmetro em qualquer ponto da broca, mm
Velocidade do fuso	$n = \frac{1000 v_c}{\pi \cdot D}, \text{rpm}$	v_c – Velocidade de corte, mm/min D – Diâmetro da broca, mm
Avanço por dente	$f_z = \frac{f}{z}, \text{mm/rev}$	f – Avanço por corte, mm/ver z – número de dente de corte
Avanço	$f = f_z \cdot n, \text{mm/rev}$	f_z – avanço por dente n – número de rotação por minuto, rpm

Fonte: Adaptado (Castilla, 2015; Castillo, 2005; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014)

Uma broca helicoidal ao longo de corte é resumidamente sujeita a esforços de torção (por causa da rotação da ferramenta de corte) e a esforços de compressão (por conta do avanço da ferramenta de corte). A força da broca canhão pode ser dividida em três partes que são: forças normais e de atrito tangencial nas arestas de corte internos e externos, forças normais e de atrito circunferencial na guia, e a força normal causada pela pressão hidráulica (pressão positiva) na superfície de folga do diâmetro externo, como pode ser observado na Figura 14 (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Liang *et al.*, 2022; Wang, Jia e Zhang, 2014).

Figura 14 – a) Análise do esforço geral da broca canhão b) Decomposição de força simplificada na guia



Fonte: (Liang *et al.*, 2022)

Onde: R_p é força normal na superfície de suporte da barra guia; R_{fx} e R_{fy} são as forças de atrito circunferencial decomposta (ou forças de atrito circunferencial decomposta na guia); p é a força normal unitária; r é o raio de furação; θ_1 é o ângulo inicial da barra guia de furação; θ_2 é o ângulo final da barra guia de furação; δ é a área de contato entre a guia e a parede interna do furo na direção do eixo Z; ω é a variável do ângulo.

A pressão positiva distribuída na região de corte é perpendicular à superfície de saída. A força de atrito distribuída na aresta de corte é perpendicular à aresta de corte e paralelo à superfície de saída. As arestas internas e externas com direções contrárias torna as forças de atrito sobre elas contrárias também. O atrito circunferencial, contrário ao sentido de rotação, é para impedir a rotação da broca canhão. O atrito axial atua ao longo da direção do eixo z, contrário à direção de avanço da ferramenta de corte. A força normal da pressão hidráulica ao longo da folga do diâmetro está direcionada para o centro do círculo (Wang, Jia e Zhang, 2014).

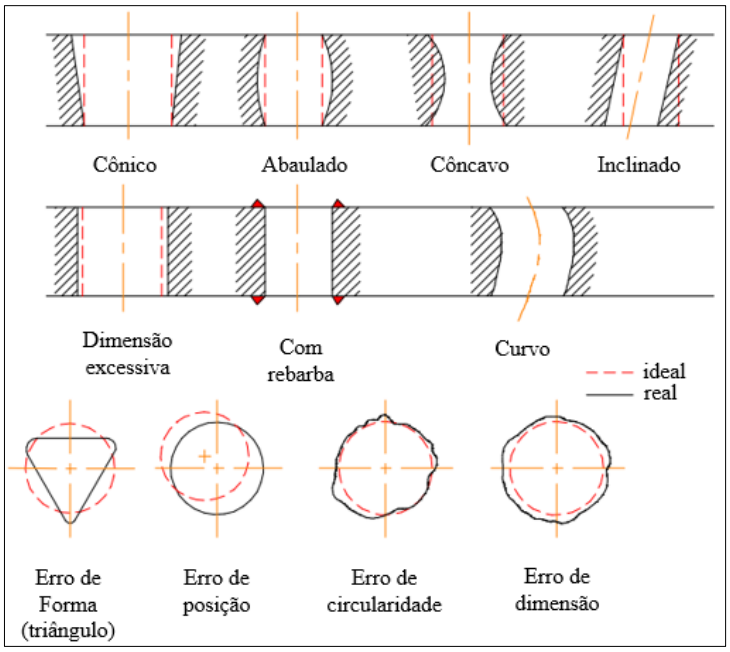
De acordo com Wang *et al*. (2014) é possível observar através das equações que a força axial e o torque da broca canhão dependem extremamente dos parâmetros de geometria, dos parâmetros de corte e das propriedades do material.

2.4 Qualidade de processo de furação

Vários são os fatores que influenciam na qualidade de furo e vida da ferramenta na furação, dentre esses, pode-se mencionar: parâmetros de corte (velocidade de corte, taxa de avanço), geometria da ferramenta (e também desgaste da ferramenta), a quebra e a remoção de cavaco, e característica dinâmica (vibração). A seleção adequada de velocidade de corte, avanço e geometria de corte pode otimizar a taxa de remoção de cavaco e a qualidade do furo. O diâmetro real do furo aumenta com a velocidade e avanço (Siddiquee *et al.*, 2014; Wang, Jia e Zhang, 2014).

Na Figura 15 são apresentados alguns erros ou imperfeições geométricas frequentemente ocorridos no furo, influenciadas pelas condições do processo.

Figura 15 – Erros frequentemente encontrado no furo



Fontes: Adaptado (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; König e Klocke, 1977 *apud* Castillo, 2005)

Erro de forma – é quando o diâmetro não é uniforme, ou seja, quando a face real da peça difere da forma geométrica ideal (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Castillo, 2005);

Erros de dimensão – Ocorrem quando o diâmetro do furo realizado difere do diâmetro da broca (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Castillo, 2005).

A forma e altura das rebarbas geradas na entrada e saída dos furos usinados procedem dos tipos de materiais da peça (por causa das suas propriedades mecânicas, principalmente a ductilidade), materiais da ferramenta, as condições de usinagem (tais como: velocidade de corte, avanço e ângulo de saída), e a composição do fluído de corte (Castillo, 2005; Nakayama e Arai, 1987; Teixeira, 1995).

Desvio (de retilineidade) – o desvio é expresso de várias formas como excentricidade, desvio de retilineidade ou desencontro do eixo. Geralmente, expressa uma alteração da direção da ponta da broca em relação ao eixo ideal de mandrilhamento. A retilineidade é influenciada pela rotação da ferramenta e peça (a melhor retilineidade é obtida quando ambas giram, mas em sentidos contrário, e a pior é obtida quando somente a ferramenta gira), comprimento do furo, bucha guia gasta ou instalada inadequadamente e falta de lunetas. Entre as ferramentas de furação profunda, o maior desvio de retilineidade ocorre na furação com broca canhão comparativamente as brocas BTA/STS e Ejector/DTS (Biermann *et al.*, 2018; Griffiths, 1975; Sandvik, 2003).

Segundo Biermann *et al*. (2018) na usinagem de furos com pequenas relações entre comprimento-diâmetro, a qualidade do furo é caracterizada pela precisão diametral, circularidade ou qualidade da superfície. Em contrapartida, a precisão longitudinal e a forma geralmente são de importância secundária.

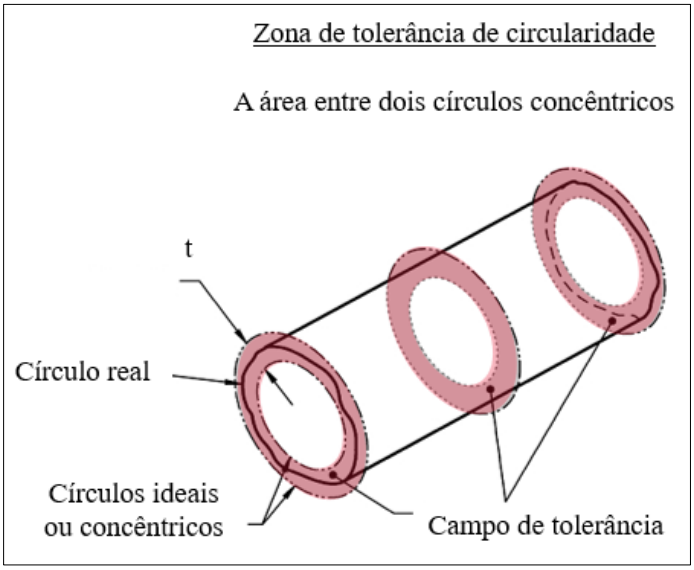
De acordo com Griffiths (1975), na usinagem de furos com relação comprimento-diâmetro muito alta, torna-se imprescindível a precisão longitudinal (quando a ferramenta é giratória e peça estacionária a excentricidade do furo pode de ser de forma parabólica).

2.4.1 Circularidade

Em ambientes de fabricação, a rotação imperfeita, erro na ação de corte, lubrificação inadequada, desgaste da ferramenta, peças defeituosas da máquina entre outros fatores podem causar mudança nos perfis circulares. Erro de circularidade é

definido como a seção circular distorcida. A tolerância de circularidade (t) é entendida como o maior desvio permitido do diâmetro. O campo de tolerância é representado por uma área em uma superfície perpendicular ao eixo da superfície de revolução, delimitada por dois círculos concêntricos espaçados entre si de uma distância igual à tolerância de circularidade “t”, conforme a Figura 16. (Anuryev, 2001; Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Zhang, Cheng e Zhang, 2020).

Figura 16 – Tolerância de circularidade



Fontes: adaptada próprio autor

De acordo com Agostinho *et al*. (1977) dificilmente será preciso indicar a tolerância de circularidade em desenhos técnicos, exceto em casos funcionais em que não é possível alcançar a precisão exigida somente com a tolerância dimensional (por exemplo, em cilindros de motores a combustão).

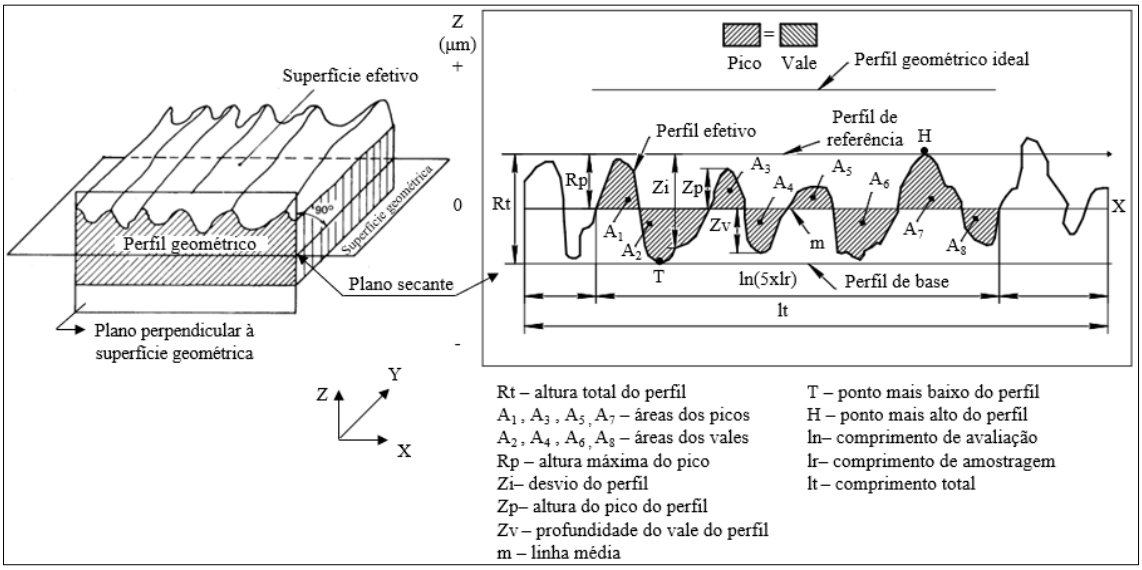
As instruções relacionadas à medição e avaliação da circularidade estão explicadas na norma ISO 12181-1 e 2. De forma geral, é possível classificar os métodos de medição de erro de circularidade em diametrais, cordais e radiais. No método diametral, o erro de circularidade é obtido a partir da metade da diferença entre maior e menor diâmetro (dentre os vários medidos). No método cordal a peça é posicionada em um bloco em forma de V, depois rotacionada à medida que são observadas a leitura através de um medidor de deslocamento. No método de medição radial que geralmente é utilizado para medição da circularidade, o instrumento de medição pode ser: de mesa rotativa e de eixo (ou sensor) rotativo (Janusiewicz *et al.*, 2011; Paziani, 2005; Tian, Wang e Wang, 2020).

Para medição da circularidade, quatro métodos de referência são reconhecidos internacionalmente: Círculo da Zona Mínima (MZC), Círculo dos Mínimos Quadrados (LSC), Círculo Máximo Inscrito (MIC), Círculo Circunscrito Mínimo (MCC). Na literatura, o único método que atende às normas ISO e ANSI e possui o valor mínimo de erro de circularidade é o MZC entre os quatro métodos. No caso de avaliação de erro de circularidade em um eixo é preferível o método MCC, e em furo é preferível o método MIC. Entre os demais métodos, o LSC é o método mais utilizado na avaliação de circularidade devido à simplicidade de sua aplicação (Elerian, Helal e AbouEleaz, 2021; Janusiewicz *et al.*, 2011; Saif *et al.*, 2022; Sui e Zhang, 2012; Tian, Wang e Wang, 2020).

2.4.2 Rugosidade

Rugosidade (ou desvio micro geométrico) – é o conjunto de pequenos desvios (imperfeições) superficiais, derivado do processo de usinagem, ou ainda, é o conjunto de irregularidades com passos relativamente pequenos subdivididos com ajuda do comprimento base, conforme a Figura 17. As rugosidades também são conhecidas como erros microgeométricos ou ainda textura primária (Chiaverini, 1986; GOST 25142-82, 2018).

Figura 17 – Rugosidade

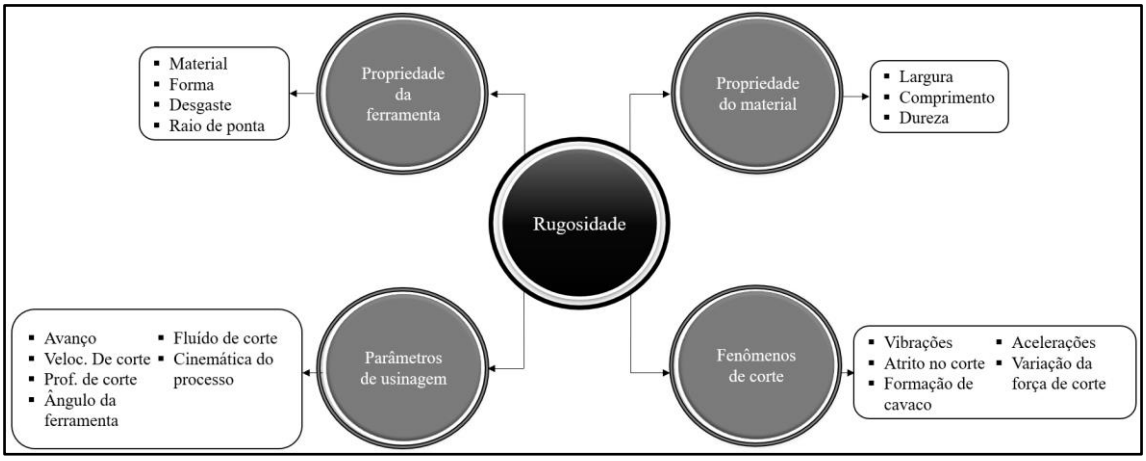


Fontes: Adaptado (Chiaverini, 1986; Maia, 2012; Santos e Sales, 2007)

A rugosidade é uma característica que é medida diretamente na superfície através de instrumentos chamados rugosímetros. O apalpador do rugosímetro possui uma ponta finíssima com raio de 1 µm. A unidade de medida da rugosidade é o µm (mícron) (Cunha e Cravenco, 2006).

O valor de uma boa ou má afiação da ferramenta é de extrema importância, pois o estado da rugosidade no intervalo de tolerância provém dela. A rugosidade também é influenciada pelos parâmetros de corte (velocidade, taxa de avanço e profundidade de corte), fluido de corte, propriedades da ferramenta, propriedades do material e fenômenos de corte, conforme a Figura 18 (Benardos e Vosniakos, 2003; Cunha e Cravenco, 2006; Shaw, 2005).

Figura 18 – Fatores que influenciam a rugosidade de superfície usinadas



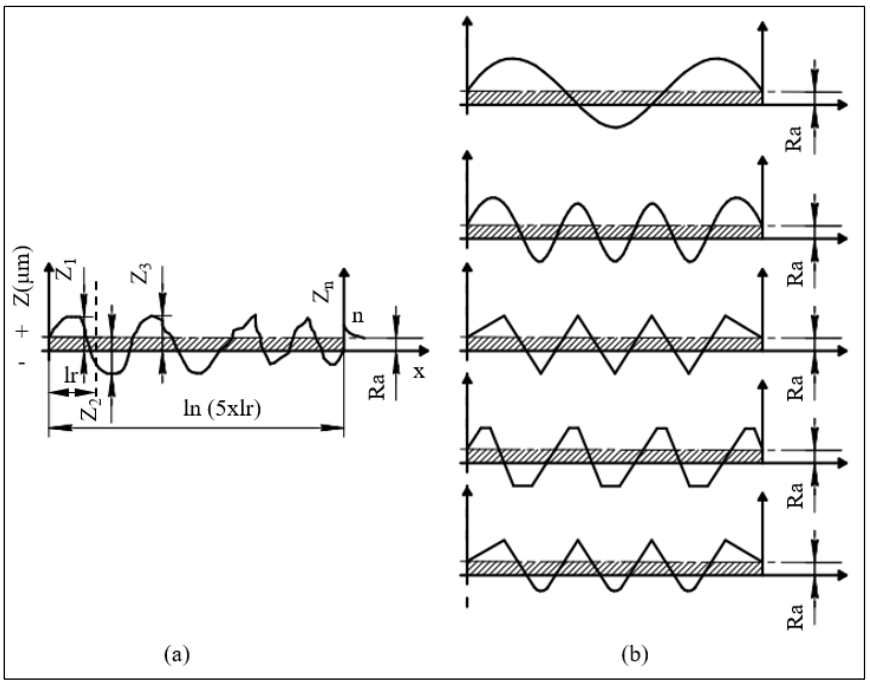
Fonte: Adaptado (Benardos e Vosniakos, 2003)

Existem dois sistemas de medição da rugosidade que são: linha média (M) e envolvente (E). O sistema de medição de linha média (M) é utilizado em países como USA, Japão, Reino Unido, Rússia e Brasil (de acordo com as normas ABNT NBR 6405/1988 e NBR 8404/1984 substituída pela ABNT NBR 17068/2022). Já o sistema de medição envolvente (E) é utilizado na Alemanha, França e Itália. A linha média (M) – é a linha imaginária paralela à direção geral do perfil, traçada de tal maneira que a soma das áreas dos picos (acima), sejam iguais à soma das áreas dos vales (abaixo) no comprimento de amostragem (Chiaverini, 1986; Santos e Sales, 2007).

O comprimento total (l_t) para avaliação da rugosidade é constituída por 3 partes: comprimento de aceleração do apalpador (conhecida em inglês como *run up*), comprimento de avaliação (que corresponde aos 5 comprimentos de amostragem (l_r) também conhecidas em inglês como *cut off*) (l_n), e o comprimento de desaceleração do apalpador. Existem vários parâmetros utilizados para determinar a rugosidade de uma superfície, as mais utilizadas são: rugosidade média (Ra), rugosidade média (Rz), rugosidade total (Rt) e etc.

Parâmetro Ra (rugosidade média atualmente conhecida como desvio aritmético médio do perfil de rugosidade) – é a média aritmética dos desvios do perfil efetivo, relativamente à linha média. É o parâmetro mais utilizado e conhecido, aparece em quase todos os instrumentos de medição da rugosidade. É aplicado na maior parte dos processos de fabricação em casos de acabamento estético (menor exigência), controle da rugosidade nas linhas de produção entre outras. As desvantagens: não faz diferença do vale e pico, não detecta erro de perfil e superfícies com perfis diferente podem fornecer o mesmo valor de Ra. Na Figura 19 é possível observar este tipo de rugosidade em diferentes perfis (Maia, 2012; Santos e Sales, 2007).

Figura 19 – a) Rugosidade média (Ra); b) Perfis de rugosidades com o mesmo valor de Ra e diferentes aspectos



Fontes: Adaptada (Bhushan, 2000; Santos e Sales, 2007).

O parâmetro de rugosidade média Ra é determinado pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

$$R_a = \frac{1}{lr}\int_0^{lr} |Z(X)|dx \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

$Z(x) -$ elevações acima (altura de picos) ou elevações abaixo (profundidade de vales) avaliados no comprimento da amostragem.

Contudo, se ln for maior que lr, então o valor de Ra é a média dos valores de Ra obtidos em cada comprimento de amostragem (Beckert *et al.*, 2012).

Segundo Santos e Sales (2007, p.206) "como Ra não caracteriza a geometria das irregularidades da superfície, outros parâmetros foram definidos". Tais como: rugosidade média (Rz), rugosidade máxima ($R_{máx}$ ou R_y), rugosidade total (R_t) (Stephenson e Agapiou, 2016; Tabenkin, Tarasov e Stepanov, 2007).

2.5 Materiais da ferramenta para furação

O material da ferramenta faz parte dos itens fundamentais no processo de usinagem. Tanto o material quanto a geometria da ferramenta devem ser meticulosamente selecionadas com relação ao material de trabalho (dureza e tipo de cavaco), processo de usinagem (com ferramentas ou peça rotativas de menor diâmetro), máquina-operatriz (estabilidade, potência, rotação, estado de conservação que será utilizado, forma e medidas da ferramenta), forma e tamanho da ferramenta (forma não padronizada é feita de aço ou metal duro que possibilita solda do cabo, tamanhos pequenos são feitos de aço-rápido por causa da alta rotação), condições de operação (ferramenta tenaz em caso de corte interrompido ou/e sistema MFDP pouco rígida), a quantidade de material de remoção, a precisão e acabamento (grandes velocidades de corte, avanço e profundidade de corte pequenos) e o custo do material da ferramenta (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Shaw, 2005).

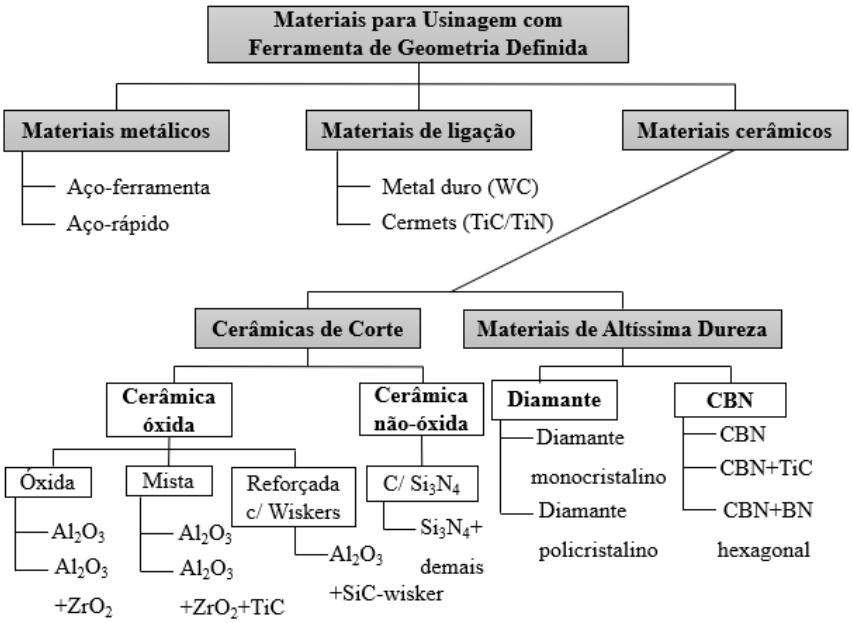
Existem quatro características fundamentais na escolha do material apropriado para ferramenta de corte (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Shaw, 2005; Smith, 2008; Stemmer, 1993):

a) Dureza a quente
b) Resistência ao desgaste
c) Tenacidade
d) Estabilidade química

A ferramenta deve ser mais dura do que o material a ser usinado, além disso todo material perde dureza quando aquecido. O bom material é aquele que perde dureza, mas não perde muito. A tenacidade é a resistência ao choque térmico (ou ruptura), ou seja, é a energia necessária para romper o material ou quebrar a ferramenta. A resistência ao desgaste por abrasão é a característica na qual o material resiste ao desgaste por atrito. A estabilidade química é bastante importante em velocidades de corte altas para evitar desgaste por difusão.

Não há uma classificação geral de materiais para ferramentas de corte, todavia baseando-se nas caraterísticas químicas elas podem ser classificadas de acordo a Figura 20:

Figura 20 – Materiais para ferramenta de corte com geometria definida



Fonte: (König e Klocke, 1997 *apud* Alves, 2010)

Em 1905, o aço rápido foi chamado de aço de ferramenta de alta liga de tungstênio (W), molibdênio (Mo), cromo (Cr), vanádio (V), Cobalto (Co), nióbio (Nb). Este material é tenaz, de grande resistência ao desgaste e grande dureza a quente, cerca de 600ºC, comparativamente aos aços carbonos utilizados para ferramentas. Geralmente, os aços rápidos com elevadas resistências ao desgaste por abrasão possuem menos tenacidade (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Ferraresi, 1970; Shaw, 2005; Smith, 2008).

Existem duas categorias de aços rápidos: a categoria simbolizada pela letra “T” (subdividido em aço rápido ao W e aço rápido ao W-Co) e categoria simbolizada pela letra “M” (subdividido em aço rápido ao Mo e aço rápido ao Mo-Co), indicados nas classificações AISI e SAE e todos eles possuem cromo e vanádio. Aço rápido T-1 foi o primeiro a ser produzido por Taylor (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Stemmer, 1993).

No âmbito do desenvolvimento de ferramentas, com intuito de melhorar o desempenho, são aplicadas camadas de revestimento de um material de maior resistência ao desgaste tal como: nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN), nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

Os dois grandes impulsos no campo das ferramentas de corte ocorreram com a descoberta de aço rápido e metal duro. Metal duro também chamado de carboneto de tungstênio sinterizado é o mais importante material de ferramenta utilizado na indústria moderna. É definido como "... um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizadas com um ou mais metais do grupo de ferro (ferro, níquel ou cobalto) formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão" (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014, p. 84; Machado *et al*., 2009). Resumidamente, o metal duro é um componente da metalurgia do pó fabricado de partículas duras (WC, TiC e TaC) sinterizados com um ligante (que geralmente é Co).

Nos metais duros mais utilizados o tamanho desta partícula varia entre 1 a 10 μm e ocupam de 60% a 90% do volume do material. A partícula WC é muito resistente ao desgaste por abrasão, contudo é limitado o uso na usinagem de aço, pois gera grande desgaste de cratera na superfície de saída. Metais duros com elevado teor de TiC são frágeis, utilizados na usinagem de aços com grandes velocidades de corte (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Stemmer, 1993). Reduzindo WC e adicionando-se certa porcentagem de TiC+TaC, mantém-se a dureza e tenacidade, e agrega estabilidade química (permite usinar aço e reduzir o desgaste de cratera).

A classificação dos metais duros de acordo a norma ISO 513/1975 se divide em três principais grupos designados por letras P, M e K. A subdivisão destes grupos é feita empregando a numeração (P01 a P50, M10 a M40 e K01 a K40), como é observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo sobre metal duro e seus revestimentos

Grupo/Classe (IS0)		P	M	K	N	S	H
Material (a ser usinado)		Aço	Aço inoxidavel	Ferro fundido	Não ferroso (Alumínio)	Superligas resistente ao calor	Aços endurecidos
Subgrupo (ISO)		01 - 50	10 - 40	01 – 40	01 - 30		
Propriedades (subgrupo)		Resistência ao desgaste (ex:01) ← ---------- → (ex:50) Tenacidade **Operações recomendáveis** Acabamento ← ---------- → Desbaste					
Revestimento	Processo	• CVD(multicamadas TiC-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiC-Al_2O_3) – Torneamento • PVD(TiN, TiCN, TiAlN) – Furação					
	Função	• Elevada dureza – Redução o desgaste abrasivo • Baixo atrito – Redução (desgaste por aderência, forças de corte, e temperatura de corte) • Menor transferência de calor - Manutenção da camada de isolamento térmico, Redução da temperatura da ferramenta					

Fonte: Adaptado (Abele e Dorr, 2002 *apud* Alves, 2010; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; ISO 513/2004E, 2004; Machado *et al*., 2009; Sandvik, 2017)

A Tabela 5 apresenta resumidamente os grupos e subgrupos de metal duro, o critério para seleção da ferramenta com relação a resistência a abrasão e tenacidade, tipos de revestimentos e operações aos quais são aplicados, e os requisitos necessários para coberturas de ferramentas de corte com respectivas consequências.

Grupo P simbolizado pela cor azul é indicado para usinagem de aços, materiais dúcteis em geral, ou seja, materiais que produzem cavacos contínuos (Ferraresi, 1970; Stemmer, 1993).

Grupo M simbolizado pela cor amarela é indicado para ferramentas com múltiplas aplicações, possui propriedades intermediárias. É empregado na usinagem de materiais metálicos, especialmente aço inoxidável (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Ferraresi, 1977; Smith, 2008).

Grupo K simbolizada pela cor vermelha é indicado para usinagem de materiais que produzem cavacos curtos (ferro fundido e materiais frágeis) e não metálicos (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Ferraresi, 1977; Smith, 2008).

Ultimamente a ISO ampliou os grupos de metal duro ISO 513/2004E para mais três grupos com os respetivos subgrupos que são: N simbolizada pela cor verde (subgrupo N01 a N30), indicada para usinagem de não ferrosos; Grupo S simbolizada pela cor marrom (subgrupo S01 a S30), indicado para usinagem de superligas e titânios;

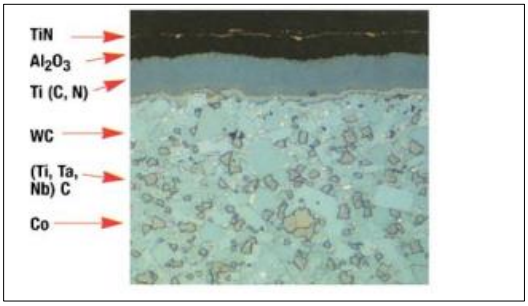
Grupo H simbolizada pela cor cinzenta (subgrupo H01 a H30) indicado para usinagem de materiais endurecidos (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Machado *et al.*, 2009).

O revestimento ou cobertura da ferramenta de metal duro adquiriu uma tremenda importância, visto que é capaz de fornecer melhor desempenho à ferramenta de corte em relação a uma ferramenta sem cobertura. As coberturas são empregadas em núcleos (substratos) de todos os grupos de metal duro. Diferente das ferramentas de aço rápido que são somente revestidos por meio da deposição física de vapor (PVD, em inglês *Physical Vapor Deposition*), os metais duros são também revestidos por meio da deposição química de vapor (CVD, em inglês *Chemical Vapor Deposition*) (Machado *et al.*, 2009).

Em 1985, as limitações básicas que resultavam do processo CVD foi ultrapassado pelo surgimento do processo PVD (quando aplicado a cobertura TiN de uma única camada pela primeira vez em metal duro). Há diversas diferenças entre a cobertura PVD e CVD, na Tabela 5 é possível observar algumas comparações entre os dois processos de cobertura (PVD e CVD) (Smith, 2008).

Há insertos com uma ou duas até três camadas de revestimentos, conforme a Figura 21. Os materiais mais utilizados são o carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN) e o carbonitreto de titânio (TiCN). A Figura 21 mostra metal duro com revestimento múltiplo (WC/Co) (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

Figura 21 – Metal duro com revestimento múltiplo (WC/Co)



Fonte: (Smith, 2008)

Em geral, acima do núcleo a primeira camada aplicada é de Ti (C, N) (pode também ser a única camada), em seguida é aplicada a segunda camada de Al_2O_3 ou TiN (em caso de duas camadas), posteriormente se adiciona TiN como terceira camada. Em casos de três camadas, Al_2O_3 torna-se camada intermediária entre Ti (C, N) que fica por baixo dela e TiN que fica por cima (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

As principais características dos revestimentos da ferramenta de corte são (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Machado *et al.*, 2009; Stemmer, 1993):

Carboneto de titânio ou carbonitreto de titânio (TiC ou TiCN): menor coeficiente de atrito, resistência ao desgaste por abrasão, promove adesão das outras camadas de revestimento. A espessura da camada é de 4 a 8 μm.

Óxido de alumínio (Al_2O_3): alta dureza a quente, alta estabilidade química (não gera desgaste de cratera), baixa condutividade térmica (que é inverso do TiC e/ou TiN). As desvantagens: baixa resistência ao choque térmico, fragilidade e adesão limitada sobre o núcleo de metal duro.

Nitreto de titânio (TiN): redução do coeficiente de atrito (entre inserto e cavaco), boa estabilidade química. A espessura da camada é de 5 a 7 μm.

2.6 Fluidos de corte

Os fluidos de cortes são usados na indústria com intuito de alavancar o comportamento e a vida das ferramentas de corte. O uso de lubri-refrigerante na usinagem dos materiais foi incluído pelo americano F. W. Taylor em 1890, o qual usou água para resfriar a ferramenta de corte. Posteriormente, utilizou uma solução de água e soda, ou água e sabão com intuito de prevenir a oxidação da peça e/ou da ferramenta de corte. Após Taylor, várias pesquisas relacionadas aos fluidos de corte e tipos de materiais para ferramentas foram desenvolvidas, como consequência, houve aumento de novos tipos de lubri-refrigerante além da água (que tem grande poder refrigerante, baixo custo, abundante, mas origina oxidação à peça/ferramenta/máquina e tem pouco poder lubrificante) (Castillo, 2005; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Ferraresi, 1970; Smith, 2008).

Ao longo do corte há uma alta quantidade de calor originada pela força necessária para deformar o cavaco e a força de atrito entre peça-ferramenta e cavaco-ferramenta. Este calor deve ser diminuído (lubrificando) e/ou removido (refrigerando) da ferramenta e peça, sobretudo com intuito de reduzir o desgaste da ferramenta de corte, a dilatação térmica da peça, prejuízo no acabamento. A redução do coeficiente de atrito nas

interfaces pode diminuir o calor gerado, esforços de corte e a potência de corte. Entretanto, o fluído de corte traz vantagem de aspecto funcional e econômico no processo de usinagem (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Ferraresi, 1970).

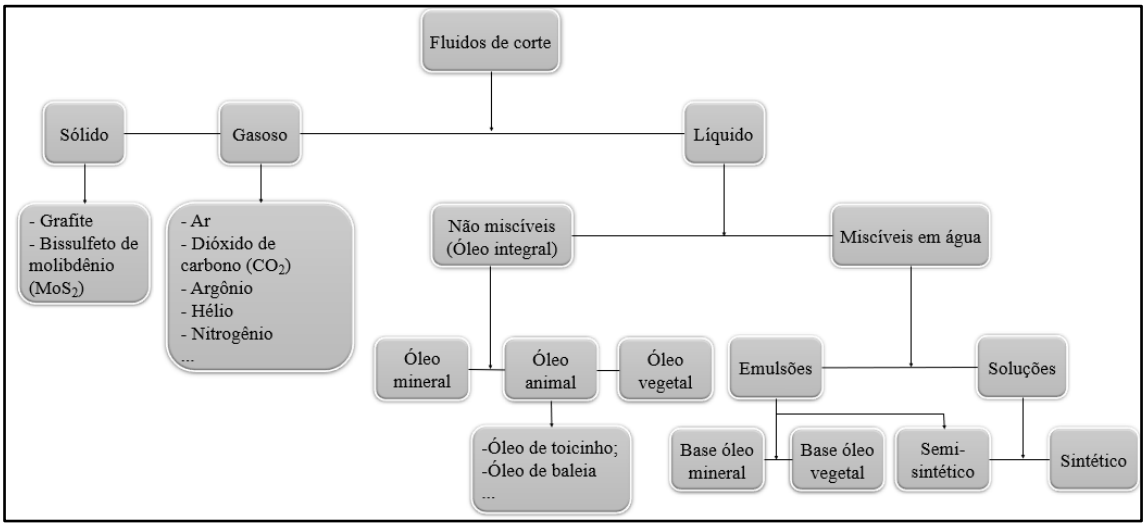
As vantagens de aspecto funcional são: diminuição do coeficiente de atrito (ferramenta-peça); retirada de cavaco da região de corte; extração de calor na ferramenta, peça e máquina; melhoria no acabamento, aumento de velocidade, taxa de avanço. As vantagens de aspecto econômico são: diminuição do consumo de energia de corte, custo da ferramenta na operação; impossibilidade de corrosão; maior número de furos por aresta de corte (Biermann *et al.*, 2018; Ferraresi, 1970; Smith, 2008).

De forma geral, as funções do fluido de corte especificamente no processo de furação são: dar suporte e lubrificar as guias, melhora da vida, dissipação do calor, escoamento de cavaco, e absorção do som.

Os mais variados tipos de fluido de corte podem ser encontrados no estado: sólido, gasoso e névoas, e líquido. Os fluídos de corte sólidos são usados no processo de usinagem somente para lubrificação, e são eles: grafite e bissulfeto de molibdênio (MoS_2). São aplicados na superfície de saída da ferramenta antes da usinagem. Os fluidos de corte gasosos e névoas apenas refrigeram, são eles: ar, dióxido de carbono (CO_2), argônio, hélio, nitrogênio e outros gases. Os fluidos de cortes líquidos têm poder de lubrificar e refrigerar, é o maior grupo, é o mais utilizado e importante (Castillo, 2005; Ferraresi, 1970).

Os mais variados tipos de fluidos de corte podem ser classificados conforme apresenta a Figura 22.

Figura 22 – Classificação de fluidos de corte



Fontes: Adaptado (Castillo, 2005; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Ferraresi, 1970; Smith, 2008)

Embora alguns fluidos de corte na classificação não sejam líquidos, segundo Ferraresi (1970), a expressão fluido de corte permanece por dois motivos: o primeiro por ser já uma expressão popular; o segundo é que o estado líquido agrega a maior parte de fluídos de corte. Mas dever-se-ia chamar agentes de melhoria de corte.

O ar como fluido de corte é usado para afastar o cavaco na região próxima do corte, principalmente em fresamento de rasgo e cavidade, o qual retornando pode quebrar a aresta de corte e comprometer a superfície usinada. É também empregado na furação de ferro fundido e ligas de magnésio (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

Os fluidos de corte não miscíveis em água: são conhecidos como óleo puro (integral), porque não são misturados com água e são compostos resumidamente de petróleo ou óleo mineral. Os óleos integrais podem ser minerais ou vegetais com ou sem aditivos (à base de cloro ou enxofre ou mistura de ambos, fornecendo característica EP ao fluido). Esse fluido de corte é utilizado especialmente em operações de desbaste pesado, onde a geração de calor proveniente de atrito é bastante elevada. Possui menor capacidade de refrigeração comparando com as miscíveis em água. A maior vantagem é a excelente lubrificação, e tem como desvantagem a baixa capacidade de extração de calor, risco de incêndio ou fumaça prejudicial, e alto custo (Castillo, 2005; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Ferraresi, 1970).

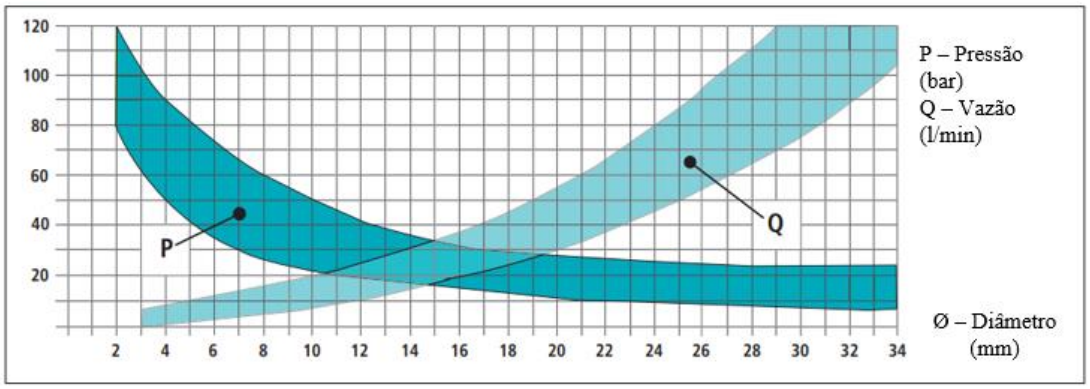
Os fluidos de corte miscíveis em água: também conhecidos como fluidos do tipo aquoso, são normalmente compostos de 60 a 90% de resultantes de petróleo ou óleo

mineral ou vegetal, emulsificantes e outros ingredientes, dispersos em pequenas gotículas na água. Os emulsificadores são substâncias que diminuem a tensão superficial (que é a tensão interfacial entre duas fases, sendo uma líquida, enquanto a outra é gasosa) da água, causando assim a dispersão do óleo na água, estabilizando a emulsão de óleo-água durante a usinagem. Desta forma, água e óleo não se misturam, logo esta é uma solução de água com gotículas de óleo espalhadas em seu interior. (Castillo, 2005; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Smith, 2008). De acordo Diniz *et al*. (2014, p.186) "as soluções são compostos monofásicos de substâncias químicas dissolvidas completamente na água". São identificados por serem livres de óleo mineral em suas composições.

Portanto, as emulsões são principalmente aplicadas em operações de usinagem que se requer mais a refrigeração da ferramenta e/ou da peça (e não muita lubrificação), onde o avanço (*f*) e a profundidade de usinagem (a_p) são baixos e/ou médios e a velocidade de corte (v_c) média ou alta, por exemplo em torneamento, furação, retificação etc. Em condições diferentes dessas é preferível óleo puro (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

O sistema de refrigeração tem de promover uma alimentação apropriada de refrigerante limpo na broca, com pressão e temperatura apropriadas. No mercado há óleos especiais para furação profunda, os quais possuem aditivos de EP (Extrema Pressão) para temperaturas extremas nas arestas de corte e pressão extremas nas guias. Para as máquinas não dedicadas para furação profunda, a vazão e pressão do lubrificante devem ser ajustadas de acordo com o diâmetro a ser furado, como mostra a Figura 23 (Biermann *et al.*, 2018; Sandvik, 2003)

Figura 23 – gráfico de pressão e vazão de fluido de corte

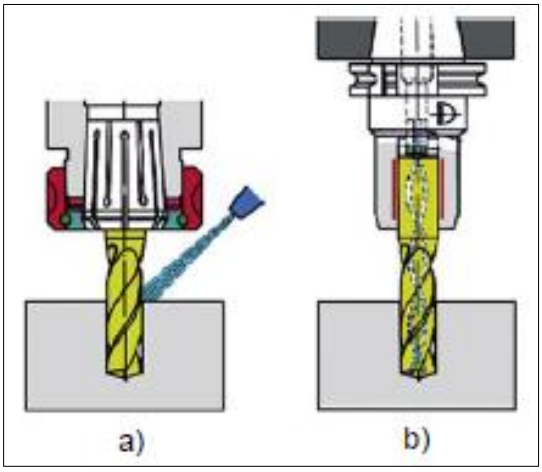


Fonte: (Botek, 2015)

Geralmente, os fluidos de corte utilizados em máquinas dedicadas à furação profunda são óleo minerais e/ou não miscíveis em água com aditivos especiais, como: aditivos AW (anti desgaste) e EP (extrema pressão) (Biermann *et al.*, 2018).

A escolha do modo de aplicação de fluidos na região de corte é feita com base na eficiência desejada na operação. Esta aplicação pode ser interna e externa. Na aplicação interna o fluido de corte é fornecido pelo fuso da máquina que atravessa os canais internos da ferramenta de corte até zona de corte. Já na aplicação externa o fluido é fornecido pelo bocal ou dispositivo portátil, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Aplicação de fluido de corte forma: a) externa e b) interna



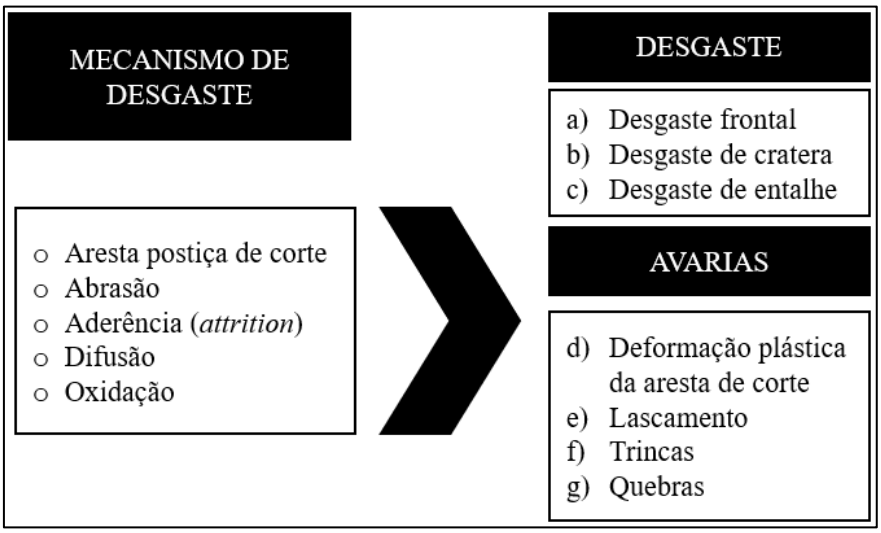
Fonte: (Lawal, Choudhury e Nukman, 2013)

2.7 Desgaste de ferramentas

De modo geral, o desgaste não é algo desejável e deve ser reduzido. Porém, pode ser desejável em casos como, por exemplo, de afiação de ferramentas e entre outros. Na ferramenta de corte ocorrem vários tipos de desgastes e avarias na usinagem de peças. A diferença entre eles reside no entendimento de que o desgaste é a eliminação ininterrupta e microscópica de porções da ferramenta por causa do efeito de corte, causando alteração na geometria original. Os desgastes podem ser: desgaste frontal (ou de flanco), desgaste de cratera, desgaste de entalhe. Ao passo que, avaria é o fenômeno que acontece subitamente, ocasionado por quebra, lascamento, trinca e deformação da aresta de corte, conforme mostra a Figura 25 (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Machado *et al.*, 2009; Santos e Sales, 2007; Shaw, 2005).

Os tipos (que são os efeitos) e os mecanismos (que são as causas) de desgaste que ocorrem na ferramenta de corte, podem ser observados na Figura 25.

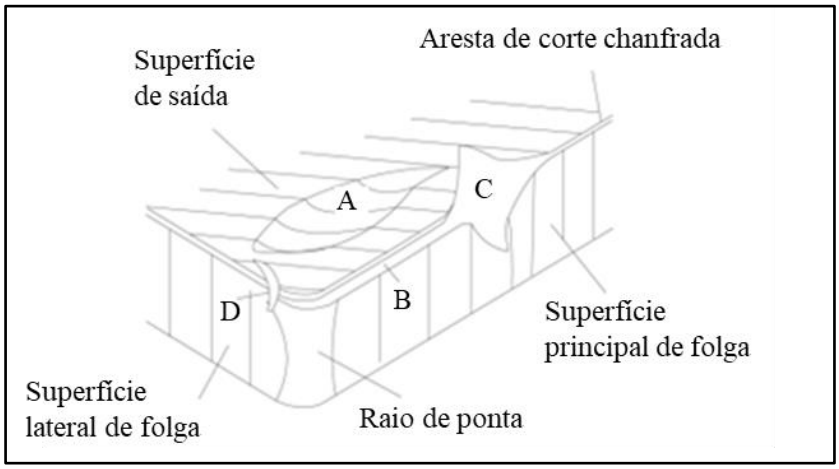
Figura 25 – Mecanismo de desgaste e desgaste da ferramenta



Fontes: adaptado (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Machado *et al.*, 2009; Santos e Sales, 2007; Stemmer, 1993)

a) Desgaste frontal (ou de flanco) – é o desgaste que acontece na face frontal da ferramenta de corte, normalmente causado pelo mecanismo de desgaste abrasivo durante o contato entre a ferramenta e peça. Reduz a qualidade e eleva atrito, Figura 26 área B (Barrios, Pivetta e Yoshikawa, 2011; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Smith, 2008).

Figura 26 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



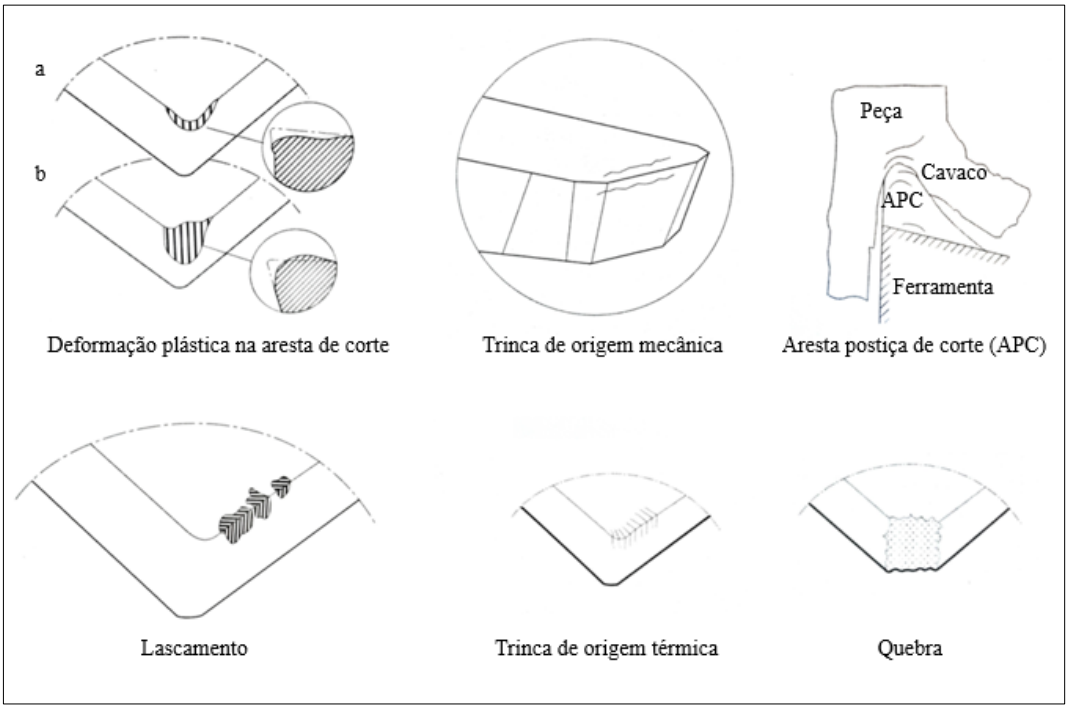
Fontes: (Machado *et al.*, 2009; Santos e Sales, 2007)

b) Desgaste de cratera – é o desgaste que acontece na face de saída da ferramenta de corte, ocasionado pelo atrito (ou elevada temperatura) na interface ferramenta-cavaco, ou ainda, resulta da combinação de um mecanismo de desgaste por abrasão e difusão, Figura 26 área A (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Santos e Sales, 2007; Smith, 2008).

c) Desgaste de entalhe – é o desgaste que acontece essencialmente por oxidação, aparece em forma de V e é causado pelas rebarbas formadas nas arestas laterais do cavaco, incluindo mecanismo de adesão, temperatura e velocidade de corte, Figura 26 áreas C e D, (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

d) Deformação plástica – é avaria que acontece no momento em que altas temperaturas em combinação com elevadas pressões ou compressão na aresta de corte, que adquire uma forma muito característica. As altas velocidades de corte e os avanços são os parâmetros de corte que podem gerar deformação plástica, Figura 27 (Smith, 2008).

Figura 27 – Avarias e mecanismo de desgaste



Fonte: Adaptada (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014)

e) Lascamento – é o tipo de avaria em que grandes partículas são removidas repentinamente (contrário ao desgaste de cratera e flanco que removem pequenas partículas). Acontece especialmente em ferramentas com material não frágil (por exemplo cerâmica) e/ou quando a aresta de corte não é muito robusta, Figura 27 (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

f) Trinca – é o tipo de avaria que geralmente acontece no corte interrompido, por causa do choque mecânico e variação da temperatura. As trincas são classificadas por trincas de origem mecânica e térmica. As trincas de origem mecânicas se formam paralelas à aresta de corte na face de saída e/ou frontal. As trincas de origem térmica se formam perpendiculares à aresta de corte, Figura 27 (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Machado *et al.*, 2009).

Aresta postiça de corte – é a camada de sobremetal aderida na aresta de corte (na interface entre o cavaco e a face de saída), que altera o seu desempenho relativamente à força de corte, acabamento da peça e desgaste da ferramenta de corte (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

Abrasão – é a remoção de pequenas partículas de material, resultante do deslizamento sob elevada pressão e temperatura na interface de peça-ferramenta (Stemmer, 1993).

Aderência (ou *attrition*) – em geral acontece em baixas velocidades de corte (baixa temperatura), no qual o escoamento do material na face de saída fica instável, menos linear (Santos e Sales, 2007; Trent e Wright, 2000).

Difusão – é um tipo de ação química (transferência de átomos de diferentes metais) na face da ferramenta de corte, semelhante à corrosão (oxidação), e depende da solubilidade (temperatura) das várias fases do material da ferramenta no metal que escoa sobre a superfície, e não da dureza dessas fases (Trent e Wright, 2000).

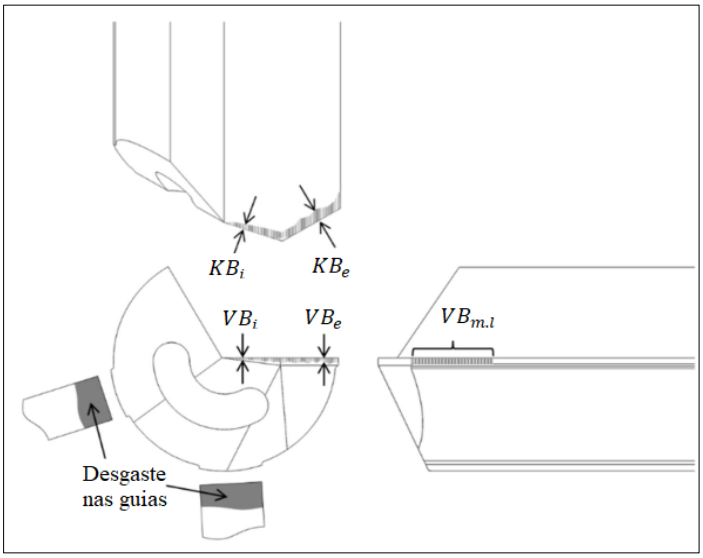
Oxidação – é ocasionado em elevadas temperaturas em companhia de ar e água (presente nos lubri-refrigerante). O desgaste por oxidação se desenvolve principalmente nas bordas onde há contato entre cavaco-ferramenta, por causa da passagem de ar nesta zona (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

Segundo Santos e Sales (2007) os mecanismos de desgaste como difusão, abrasão ou *attrition*, agem particularmente ou juntamente, desenvolvendo desgaste por meio da deformação plástica por cisalhamento e elevadas tensões de compressão ou entalhe.

2.7.1 Formas de desgaste na broca canhão

Na broca canhão ocorre desgaste e requer (re)afiação ou ainda a substituição. Na Figura 28 é possível observarmos as partes da broca canhão onde ocorre desgaste.

Figura 28 – Caracterização dos diferentes tipos de desgaste para uma broca canhão



Fonte: (Neo, Liu e Kumar, 2020).

Onde: $KB_i -$ Desgaste de cratera interno; $KB_e -$ Desgaste de cratera externo; $VB_i -$ Desgaste de flanco interno; $VB_e -$ Desgaste de flanco externo; $VB_{m.l} -$ Desgaste na lateral.

Na Tabela 6 estão apresentadas as causas e soluções de desgaste de flanco na broca canhão.

Tabela 6 – Causas e soluções de desgaste de flanco na broca canhão

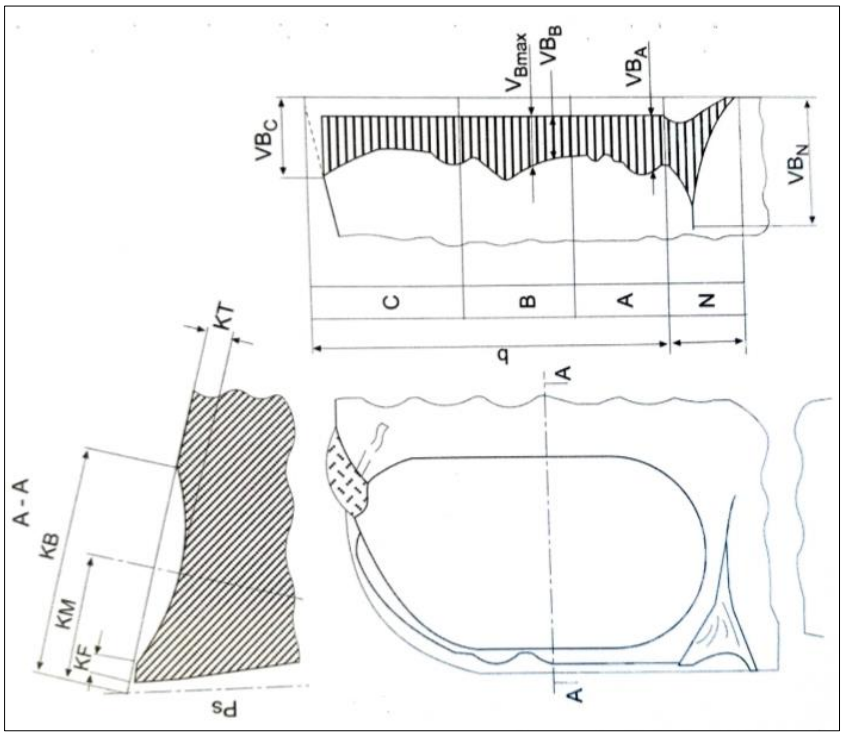
Problema	**Causas**	**Soluções**
Desgaste de flanco	-Velocidade de corte muito alta	-Reduzir a velocidade de corte;
	-Os cavacos param muito bruscamente na superfície	-Retirar o revestimento na face
	-Baixa taxa de avanço	-Aumentar a taxa de avanço
	-Ângulo de folga muito baixo	-Aumentar o ângulo de folga

Fonte: Adaptado (Guhring, 2020)

2.7.2 Medição do desgaste da ferramenta de corte

Os parâmetros utilizados para medição de desgaste da ferramenta de corte na superfície de saída e na superfície de folga, tendo em conta o plano ortogonal da ferramenta, é observado na Figura 29.

Figura 29 – Desgaste da ferramenta de corte



Fonte: (Astakhov, 2011b; Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; ISO 3685, 1993)

Onde: KT – profundidade de cratera; KB – largura de cratera; KM – distância do centro à aresta de corte; VB – largura do desgaste de flanco (que é um valor médio do desgaste na superfície de folga); $VB_{máx}$ – largura máxima do desgaste de flanco; VB_N e VB_C – Desgaste de entalhe na superfície de folga.

2.7.3 Critério para medição de desgaste de ferramenta de corte

De acordo com a norma ISO 3685 o critério indicado para determinar os desgastes da ferramenta de corte de aço, metal duro e cerâmica, são:

a) Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0{,}3$ mm;
b) Desgaste de flanco máximo, $VB_{máx} = 0{,}6$ mm;
c) Profundidade de cratera, $K_T = 0{,}06 + 0{,}3f$, onde f é avanço em mm/ver;
d) Falha catastrófica.

Segundo Sihvo e Varis (2008) nem sempre houve facilidade na medição do desgaste de flanco, porém (Ferraresi, 1970, 1977) afirma que este critério relacionado a medição do desgaste frontal é bastante utilizado porque se considera mais fácil de medir. Em estudos posteriores, Sihvo e Varis (2010) observaram isso, corroborando ainda mais a afirmação de Ferraresi e acrescentam que há mais precisão porque aresta postiça de corte não afeta a medição do desgaste de flanco. Os fabricantes de brocas canhão recomendam que o nível de desgaste frontal seja 0,3 mm, para que haja facilidade na reafiação e baixos custos econômicos.

É preciso ter cuidado com o desgaste excessivo em ferramenta de corte, pois traz consigo algumas implicações como: exigir maior esforço para remoção de cavacos, retardar o tempo de recuperação do nível padrão da força de avanço quando for trocada para uma nova (afiada), produzir cavacos longos (por causa da dificuldade de quebra de cavacos), causar vibração (o que também pode reduzir os esforços de corte, técnica bastante utilizada na tecnologia de corte por vibração ultrassônica, onde a ferramenta vibra elipticamente reduzindo os esforços), emissões acústica e quebra (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Machado *et al.*, 2009; Sihvo e Varis, 2010).

2.8 Vida da ferramenta

A vida da ferramenta é definida como o período na qual a ferramenta exerce a sua função precisamente, até se tornar incapaz de realizar o corte, num critério previamente determinado (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014; Ferraresi, 1970).

Os critérios para analisar a vida da ferramenta de corte que prejudica consideravelmente os elementos usinados, são (Smith, 2008):

1. Tem de ser capaz de conservar as tolerâncias definidas no projeto;
2. Conservação da qualidade do acabamento superficial;
3. Tem de ser capaz de quebrar o cavaco.

Segundo Diniz *et al* (2014) as condições de corte que mais influenciam no aumento de desgaste, e consequentemente reduzem a vida da ferramenta, são: velocidade de corte, avanço e a profundidade de corte. E o parâmetro com maior influência é a velocidade de corte.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo de materiais e métodos apresenta detalhadamente as informações de como foi conduzido a presente pesquisa, máquina-ferramenta utilizada, ferramentas de corte e suas respectivas especificações, descrição das características do corpo de prova, fluido de corte, metodologia dos experimentos, condições de corte, bem como os métodos de medição do desgaste da ferramenta, circularidade e rugosidade do furo usinado. Os ensaios desta pesquisa foram realizados no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM).

3.1 Metodologia dos experimentos

Os ensaios experimentais visam encontrar as condições de furação profunda na qual o desgaste da ferramenta e a qualidade de furo realizado apresente resultados satisfatórios quando comparados com as condições do fabricante da ferramenta, limites da empresa e os outros dados, e assim, corroborar no que diz respeito às publicações da temática, que até o presente momento são poucas.

A seguir serão apresentadas as etapas da condução prática deste trabalho. Resumidamente, foi feita a seleção do material para o corpo de prova, ao receber o corpo de prova foi feita a caracterização do material para obtenção da microestrutura e microdureza. Depois disso, como ferramenta de corte para realização de furo profundo foram selecionadas a fresa de topo para abertura do furo piloto e broca canhão para realizar o furo com profundidade total de 250 mm. Para o controle das variáveis de saída foi feita uma matriz de planejamento com as condições fixas para a fresa de topo e variadas através do processo de planejamento experimental para broca canhão. Esta etapa é crucial na pesquisa pois apresenta as variações das condições de corte que devem conduzir a diferentes desgastes, circularidade e rugosidades, que serão analisados posteriormente. Em seguida, para refrigeração e lubrificação da região de corte foi selecionado um fluido emulsionável que será fornecido externamente e

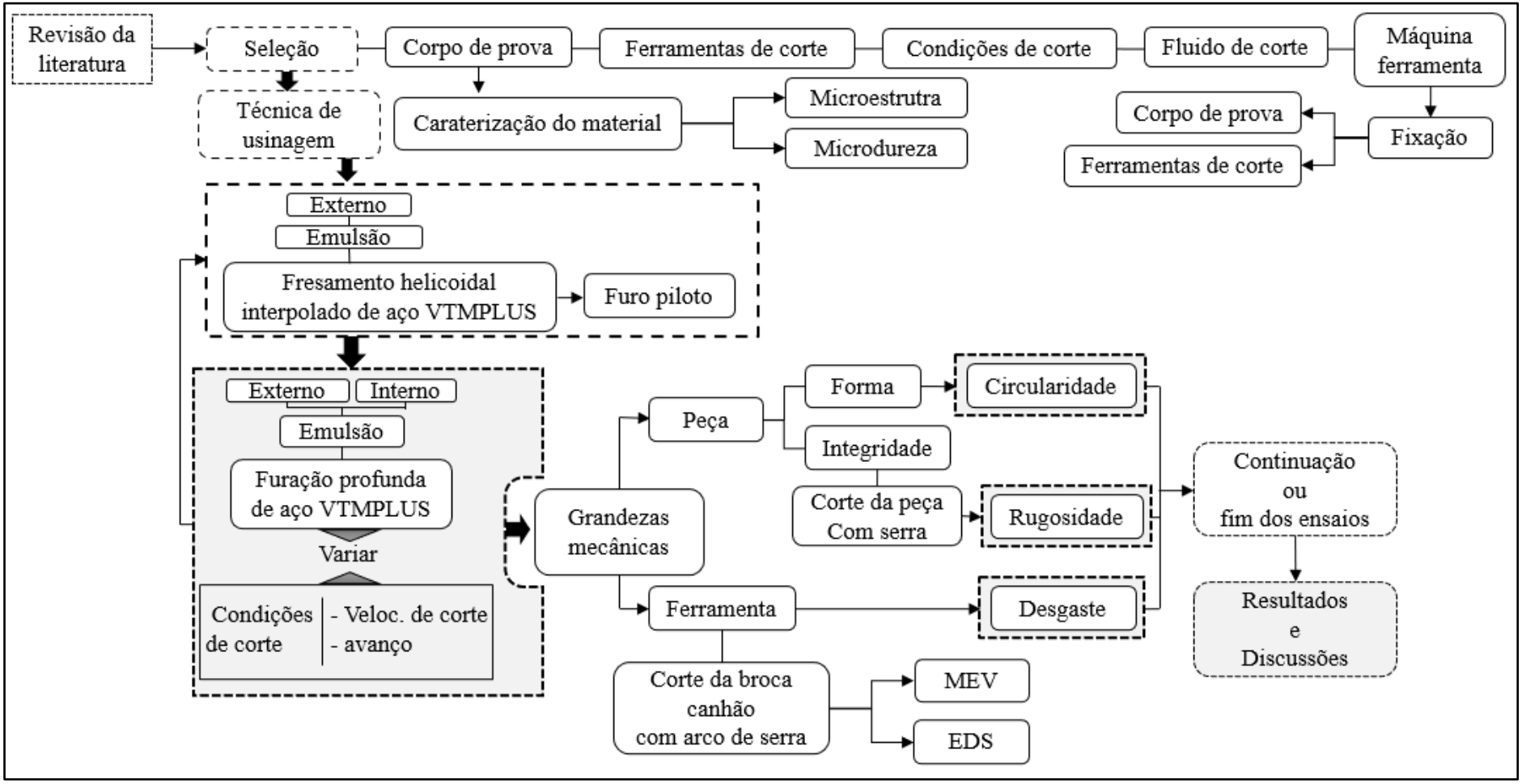
internamente (somente para a broca canhão). Logo após, para máquina ferramenta foi selecionado um centro de usinagem vertical CNC o qual possibilita a fixação do corpo de prova e ferramentas de corte tendo em conta as suas respectivas dimensões, com capacidade de fornecer o fluido de corte interna e externa (na vazão e pressão necessária), e atender as condições de corte utilizadas na pesquisa.

Após a seleção descrita, as técnicas de usinagem utilizadas foram fresamento helicoidal interpolado para realizar o furo piloto com fornecimento de fluido externo, e furação profunda com fornecimento de fluido externo e interno para realizar furos desejados utilizando as variadas condições de corte (porém, sem repetição).

Em seguida, foram medidas e analisadas as grandezas mecânicas. Na ferramenta de corte foi medido o desgaste de flanco, posteriormente, cortada a ponta da broca para análise no MEV e EDS. Na peça foi medida e analisada a circularidade, com ajuda de uma máquina de medição por coordenadas, em seguida a rugosidade através de um microscópio óptico. Só que, para a medição de rugosidade é necessário realizar corte na peça para alcançar a superfície do furo em toda sua extensão (para expor a superfície a ser avaliada).

A Figura 30 apresenta um resumo das etapas de como foi a condução prática deste trabalho.

Figura 30 – Etapas de condução da pesquisa



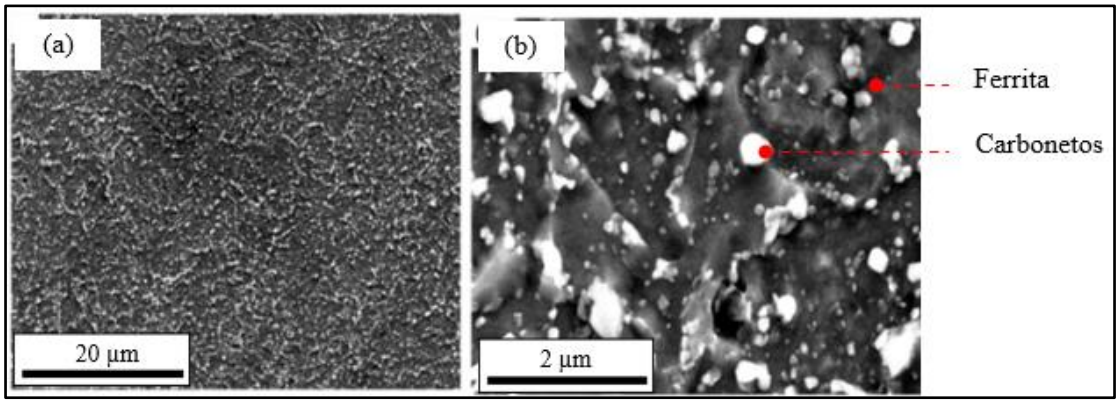
Fonte: Próprio autor

3.2 Corpo de prova

O corpo de prova utilizado para ensaio foi um bloco de aço-ferramenta no estado recozido, com as dimensões de 203x203x250 mm, comercialmente conhecido como VTMPlus desenvolvido pela Villares Metals. Este material também é utilizado como alternativa para Aço AISI H11 e H13 porque possuem características semelhantes.

Para a caracterização microestrutural do aço VTMPlus, o material foi embutido em baquelite, foram utilizadas 4 lixas de 220, 400, 600 e 1200 *mesh* para acabamento superficial, posteriormente foi realizado polimento abrasivo com alumina de 1,0 μm e ataque químico com reagente nital à 2%. As imagens de microestrutura e das brocas foram realizadas com ajuda de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Philips, modelo XL30 FEG, acoplado com analisador semiquantitativo por espectroscopia por energia dispersiva (EDS), disponível no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da UFSCar. A Figura 31a e Figura 31b mostram a microestrutura do aço VTMPlus com uma matriz ferrítica (parte escura) de baixa dureza e presença de carbonetos esferoidizados (pequenas partículas claras, ricos em molibdênio), fina e uniformemente dispersos.

Figura 31 – Microestrutura do aço VTMPlus no estado recozido para 223 ± 3 HV0,5



Fonte: Próprio autor

A Tabela 7 apresenta os resultados referentes à análise semiquantitativa da espectroscopia por energia dispersiva (EDS), realizada no aço VTMPlus. É possível observar que o Ferro (Fe) com 89,2% em peso apresenta maior quantidade, ao passo que Vanádio (V) com 0,8% em peso é o elemento que apresenta a menor concentração. E a

Tabela 8 apresenta a composição química dos materiais alternativos Aço AISI H11 e H13.

Tabela 7 – Resultados da análise semiquantitativa de EDS do aço VTMPlus

Material	**Elementos**					
	C	Cr	Mo	Si	V	Fe
	%	%	%	%	%	%
VTMPlus	0,70	4,90	2,50	1,90	0,80	89,20

Fonte: Próprio autor

Tabela 8 – Composição química do Aço AISI H11 e H13

Material	**Elementos**					
	C	Cr	Mo	Si	V	Fe
	%	%	%	%	%	%
AISI H11	0,38	5,00	1,30	1,10	4,40	0,40
AISI H13	0,38	5,00	1,30	1,00	0,90	0,40

Fonte: (Riccardo *et al.*, 2021)

Para medição de microdureza do aço VTMPlus no estado recozido, foi utilizado um durômetro da marca Shimadzu, modelo HMVG20ST, com carga de 0,500 kgf com um tempo de 15 s durante aplicação da carga sobre a amostra, utilizando uma lente de magnificação de 40x. A dureza média do material no estado recozido é de 223 ± 3 $HV_{0,5}$.

3.3 Ferramentas de corte

Nos ensaios de usinagem foram utilizados dois tipos de ferramentas de corte que são: fresa de topo e broca canhão. A fresa de topo inteiriça de metal duro com Ø 6 mm e comprimento de 57 mm foi empregada neste ensaio para furação ou rasgo, ou seja, para realização dos pré – furo através do processo de fresamento helicoidal interpolado. Este processo, além de produzir furo que garante a estabilidade na broca canhão no início da furação, também fornece uma superfície plana que assegura o contato com a peça, visto que, o *design* da broca canhão é assimétrico. A ferramenta possui três arestas de corte, e

três ranhuras em forma helicoidal na parte externa da fresa que possibilita a saída de cavaco, Figura 32.

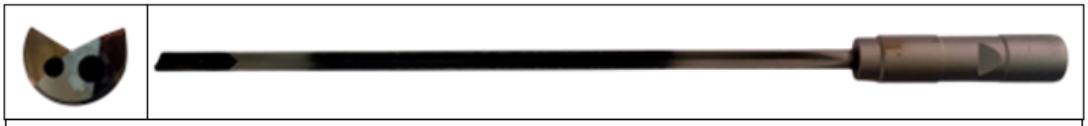
Figura 32 – Fresa de topo

Geometria:
Diâmetro: 6 mm; Nº de gumes: 3;
Cobertura: TiAlN;Furo de refrigeração: sem.

Fonte: Próprio autor

Foram utilizadas brocas canhão (simbolizadas pela sigla GD do inglês *Gun Drill*) de Ø 8,5 mm com o comprimento total (pinça + haste) de 360 mm, as quais realizaram furos de 250 mm que de acordo com a relação entre comprimento e o diâmetro (l/d) corresponde a um furo profundo, uma vez que, a relação é maior do que 10. A broca possui um corpo de aço carbono e uma cabeça de metal duro unidas por meio de solda. Conforme a Figura 33 as principais características destas brocas são: dois furos no interior da ferramenta partindo da haste até a cabeça da broca (que possibilitam a refrigeração interna), duas arestas de corte (uma principal e outra secundária), e um canal em forma de V na parte externa da broca (que possibilita a saída de fluido de corte misturado com cavaco).

Figura 33 – Broca canhão



Geometria:
Diâmetro: 8,5 mm;
Cobertura: TiAlN;
Nº de gumes: 1 Primário e 1 Secundário;
Furo de refrigeração: 2 furos internos.

Fonte: Próprio autor

As duas ferramentas de corte são de metal duro, possuem tamanho de grão submicrométrico, e pertencem a classe IC908 (que é método de classificação metal duro empregado pela ISCAR, corresponde de P15 a P40) com uma única camada de revestimento de TiAlN (nitreto de titânio alumínio). Os revestimentos das ferramentas de corte foram realizados pelo processo de disposição física de vapor (PVD). Todas as ferramentas de corte foram fornecidas pela empresa ISCAR do Brasil. A fresa de topo é uma ferramenta comercialmente encontrada e está especificado no catálogo do

fabricante com código ECC060E14-3C06-E57 IC908. Já a broca canhão é uma ferramenta de corte especial, pois no catálogo da ISCAR normalmente não há brocas canhão de Ø 8,5mm com o comprimento de 360mm (estas dimensões são produzidas somente mediante solicitação) e os parâmetros geométricos desta broca canhão provavelmente são semelhantes às das brocas comerciais.

3.4 Condições de usinagem

Para realização do furo piloto não passante com relação l/d de 1,17 a Tabela 9 apresenta as condições de usinagem utilizadas no fresamento helicoidal interpolado com emulsão aplicado por bicos externos à ferramenta.

Tabela 9 – Condições de corte para realização do furo piloto

Processo	**Fresamento helicoidal interpolado**
Velocidade de corte v_c [m/min]	150
Avanço f_z [mm/dente]	0,028
Condições de lubrificação	Emulsão externa

Fonte: Próprio autor

Os parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios deste trabalho, que se encontram próximos dos valores recomendados pelo fabricante da ferramenta de corte, foram definidos em parceria com a empresa ISCAR. Partindo da condição recomendada foi decidido uma variação de velocidade de corte em um nível superior, e duas variações de avanço em um nível inferior e superior. Na Tabela 10 são apresentadas as faixas para as condições de usinagem empregadas nos experimentos de furação profunda passante de diâmetro 8,5 mm com relação l/d de 29,41 e aplicação de emulsão em abundância (externamente pelo bocal e internamente através de dois furos internos na ferramenta de corte).

Tabela 10 – Condições de corte para furação profunda

Processo	**Furação com broca canhão**					
	A	B	C	D	E	F
Velocidade de corte vc [m/min]	60	70	60	70	60	70
Avanço fz [mm/dente]	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Condições de lubrificação	Emulsão externa e interna					

Fonte: Próprio autor

3.5 Fluido de corte

Neste trabalho foi utilizado fluido de corte comercialmente encontrado, disponibilizado pela empresa Blaser Swisslube do Brasil Ltda. A máquina MORI SEIKI – NMV 5000 DCG da CNPEM possui um tanque com uma capacidade de 700 L, o qual foi abastecido com fluido emulsificável a base de óleo vegetal que se aplica para as operações de fresamento e furação, a concentração foi 10 % e o pH 9,5. A medição da concentração foi realizada a partir de um instrumento óptico chamado refratômetro. Na Tabela 11 é possível observar as condições a qual foi aplicado, o tipo de fluído e as características deste mesmo produto.

Tabela 11 – As condições, composições e características do fluido de corte

Condições de aplicação	**Fluido**	**Composição**	**Característica do fluido**
Emulsão pelo interior	VASCO 5000	-Mistura de óleos vegetais -Alquilditiofosfato de sódio -Emulsificadores -Inibidores	Óleo vegetal miscível em água, isento de cloro.
Emulsão pelo exterior			

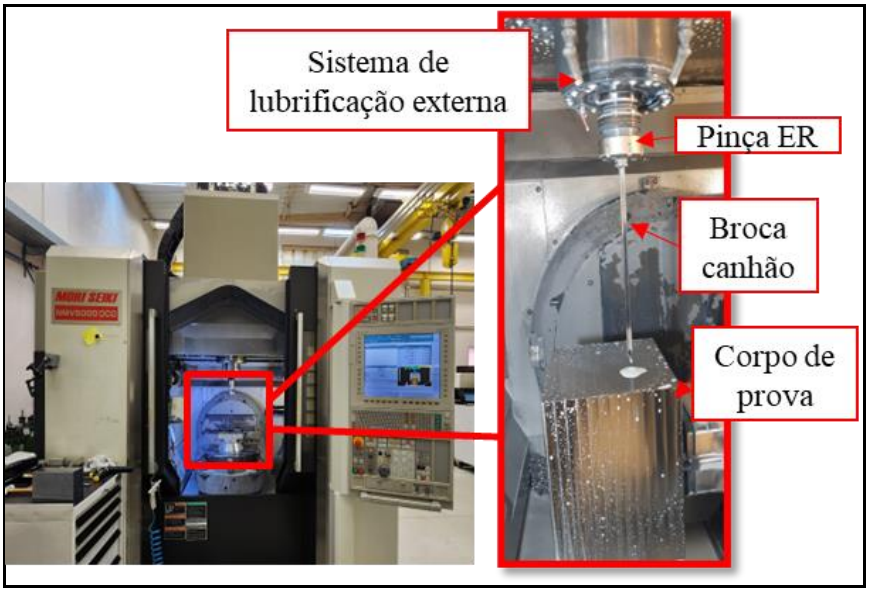
Fonte: Próprio autor

O fluido de corte VASCO 5000 foi usado na furação profunda com uma vazão de 25 l/min e pressão de 68,6 bar. Após o uso, devido ao contato com a peça, ferramenta, máquina e cavacos, deve ser coletado por uma empresa de reciclagem, conforme orientações do fabricante.

3.6 Máquina-ferramenta

Para realização dos ensaios de furação profunda foi utilizado um centro de usinagem vertical CNC com 5 eixos equipado com bomba de alta precisão da série NMV, da companhia MORI SEIKI: DCG (Conduzido no centro de gravidade em inglês *Driven at the Center of Gravity*), que controla a vibração (um dos maiores inimigos da usinagem), e com comando MAPPS4. Esta máquina ferramenta possui o curso máximo (em X = 730 mm; Y = 510 mm; Z = 510 mm e no eixo B = de +160° à -180°), o peso suportado é de até 300 kg. A capacidade máxima de rotação do fuso é 12.000 RPM, rotação máxima da mesa 1.200 RPM e avanço máximo de 70 m/min. O magazine da máquina possui 61 posições para ferramentas de corte, o tamanho (DxLxP) máximo da peça de trabalho é de 90 mm x 300 mm x 8 kg. A quantidade máxima de fluido de corte no tanque é 750 L. A Figura 34 ilustra a máquina. Ressalta-se que essa máquina, localizada no CNPEM é uma das poucas máquinas-ferramenta da região capaz de realizar os ensaios do trabalho. Isso porque para realização dos ensaios foi necessário encontrar uma máquina-ferramenta com o volume de trabalho adequado e bomba de alta pressão.

Figura 34 – Máquina-ferramenta



Fonte: Próprio autor

Para a fixação das ferramentas de corte na máquina-operatriz foi utilizado um porta-ferramenta conhecido como pinça ER (própria para refrigeração interna) com cone BT40.

Para fixação do corpo de prova na mesa da máquina foi utilizado um dispositivo de fixação da peça que estava fixada (por parafusos) na mesa da máquina-ferramenta. Entre o corpo de prova e o dispositivo de fixação havia um sistema de centragem conhecido como fixação do ponto zero LANG. Esta fixação da peça consistia em 4 furos com rosca M8 e profundidade de 15 mm na parte inferior da peça de trabalho, que com auxílio de pino de tração (também conhecido como botões de retenção) possibilitou a fixação da mesma. A flexão do corpo de prova é desprezível porque a base é rígida, Figura 35.

Figura 35– Corpo de prova (CP) utilizado nos ensaios

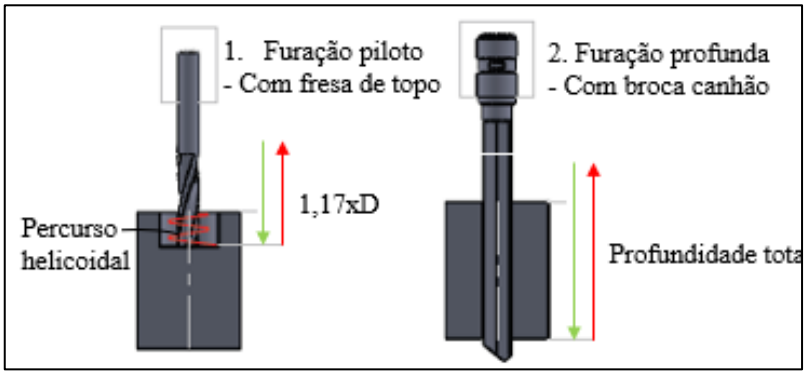
Fonte: Próprio autor

3.7 Técnica de usinagem

A técnica de usinagem utilizada neste experimento pode ser observada na Figura 36, no início foi realizado um furo piloto com uma fresa em que o diâmetro alcançado durante o fresamento helicoidal excedia 0,05 mm em relação ao diâmetro da broca canhão, com profundidade de 1,17xD. Posteriormente, era trocada a ferramenta, neste caso, a broca canhão, e esta ferramenta deslocava-se até um ponto de aproximação de 5 mm do plano de trabalho, em seguida percorria o furo piloto com uma rotação 100 rpm e avanço de 100 mm/min até alcançar a profundidade de 8 mm. Alcançando essa profundidade os parâmetros de corte se alteravam para os planejados e/ou

recomendados e neste momento também se ligava o fluido de refrigeração interna e externa. Tendo realizado o furo passante, a broca percorria mais 3 mm ultrapassando a peça de trabalho, e depois voltava com avanço de 300 mm/min e uma rotação de 100 rpm. O processo foi repetido para todos os furos realizados.

Figura 36 – Técnica de usinagem empregado nos ensaios



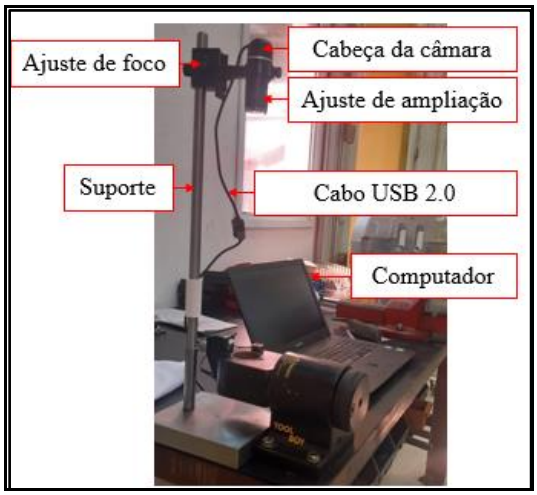
Fonte: Próprio autor

Devido à indisponibilidade da máquina ferramenta utilizado nos ensaios que atendia os requisitos necessários para realização da furação profunda, não foi possível realizar as repetições dos furos em todas as condições.

3.8 Medição de desgaste e fim de vida da ferramenta de corte

Com objetivo de analisar e medir o tipo de desgaste ocorrido na broca canhão durante a furação profunda na peça de trabalho, foi utilizado um microscópio com câmera digital, DigiMicro Profi, com zoom de 300x e câmera de 5 megapixel do fabricante dnt, como pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Fotografia do aparato montado para medição do desgaste de flanco da ferramenta de corte



Fonte: Próprio autor

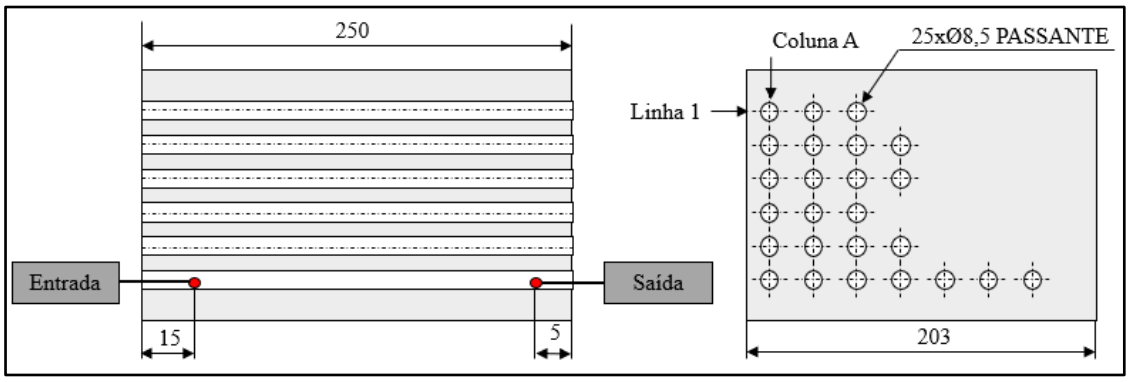
A cada furo realizado a ferramenta de corte era levada ao microscópio para captura da imagem, e com auxílio do *software Image J*, era realizada a medição do desgaste. Quando a ferramenta atingia o critério de fim de vida era trocada a ferramenta e o ensaio encerrado. O critério de desgaste e fim de vida da ferramenta de corte nos ensaios foi determinado de acordo com a norma ISO 3685 a qual estabelece que o desgaste de flanco médio (VB_B) não pode ser superior a 0,3 mm. Caso a ferramenta não atingisse esse critério então foi determinado um comprimento de usinagem máxima de 1750 mm que corresponde a 7 furos.

Para determinar o tipo de desgaste ocorrido nas ferramentas de corte e obter as imagens, foi efetuado uma análise no MEV (microscópio eletrônico de varredura). Na qual, era preciso cortar as pontas das brocas canhão afim de possibilitar seu posicionamento na câmara de vácuo do MEV. Este microscópio eletrônico de varredura estava acoplado com analisador semiquantitativo por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) que possibilitou realizar análise das composições químicas dos materiais presentes na broca canhão. A descrição do MEV pode ser vista no item 3.2.

3.9 Medição da circularidade

A circularidade dos furos, foi medida uma máquina de medição por coordenadas Mitutoyo pertencente à empresa FL - Metrologia e Soluções Técnicas Ltda. Em cada medição foram observados 6 pontos para obter o erro de circularidade ideal em uma determinada profundidade do furo. Em condições ambientais de temperatura de 20,1°C e umidade relativa (UR) de 52,3 %. A Figura 38 mostra as regiões em que foram feitas as medições de circularidade do furo.

Figura 38 – Medição da circularidade do furo

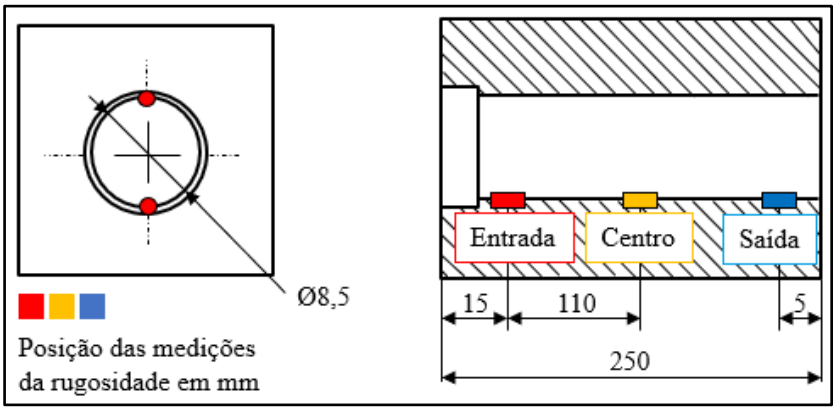


Fonte: Próprio autor

3.10 Medição da rugosidade

Para a medição da rugosidade nas superfícies dos furos foi necessário realizar cortes no corpo de prova numa máquina de serra com auxílio de uma serra da marca Starret. O instrumento empregado para medição da rugosidade foi um Alicona Infinite Focus SL da Universidade Federal de São Carlos. A ampliação com o instrumento foi de até 100 vezes. As medições foram realizadas perpendicular à direção de furação com 50 perfis em cada região do furo, a saber, entrada, centro e saída, como mostra a Figura 39. Nesta pesquisa foi avaliada apenas o parâmetro de rugosidade Ra, indicado para acabamento estético (menor exigência), controle da rugosidade nas linhas de produção entre outras.

Figura 39 – Posição das medições de rugosidade



Fonte: Próprio autor

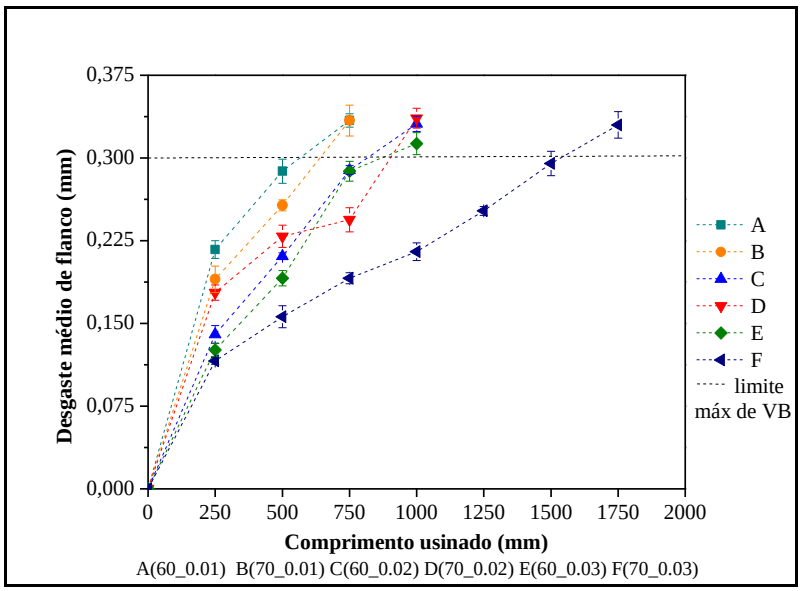
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados da influência das condições de corte no desgaste, circularidade, rugosidade com as respetivas discussões.

4.1 Desgaste da ferramenta de corte

A Figura 40 mostra a progressão do VB das brocas analisadas neste estudo em relação ao comprimento usinado. O limite de VB máximo previamente estabelecido, está indicado pela linha tracejada. Constata-se ainda que para cada velocidade de corte constante o avanço foi alterada em três valores, e que não foram realizados testes de repetição de nenhuma das condições. As curvas tornaram-se uniformes até o critério de vida da ferramenta (0,3 mm), independentemente da profundidade do passo. Os resultados obtidos por meio das medições de desgaste da ferramenta de corte de todos os ensaios, estão na Tabela A. 1 (Apêndice).

Figura 40 – Desgaste de flanco (VB) em relação comprimento usinado, das condições.



Fonte: Próprio Autor

De forma geral, os menores valores médios de desgaste da ferramenta de corte nos ensaios realizados ocorreram na condição F (v_c = 70 m/min, f = 0,03 mm/rev.) em que

(VB = 0,22 mm) e os maiores ocorreram na condição A (v_c = 60 m/min, f = 0,01 mm/rev.) em que (VB = 0,28 mm). Além disso, mantendo constante o avanço e variando a velocidade de corte, os valores de desgaste medidos tenderam a ser menores em condições em que a velocidade de corte é (v_c = 70 m/min) em comparação com a condição de velocidade de corte (v_c = 60 m/min). Segundo Arunkumar *et al*. (2018), normalmente, o desgaste da ferramenta aumenta com o aumento da velocidade do fuso. Porém estes resultados são semelhantes aos observados por Thanikasalam *et al*. (2019) onde aumento de velocidade do fuso resultou na redução de desgaste. Que é similar, ao estudo sobre furação profunda de alto rendimento utilizando broca canhão realizado por Neo *et al*. (2020). A possível explicação para tal comportamento está relacionado a temperatura e o esforço de corte. Thanikasalam *et al*. (2019) e Liang *et al*. (2022) concordam em afirmar que quanto maior for a velocidade de corte maior será a temperatura de corte. Arunkumar *et al*. (2023) explicam que isso deve se ao fato de que o aumento da velocidade do fuso aumenta a energia de cisalhamento na interface entre a ferramenta e a peça de trabalho. Reduzindo assim os esforços, a resistência do cavaco a ser arrancado e a capacidade de aderência do material na ferramenta de corte, conforme explicam Wang, Jia e Zhang (2014). Esta talvez seja a razão pela qual a menor velocidade de corte apresentou maior desgaste. Além disso, segundo Felinks *et al*. (2022) a grande capacidade de resfriamento da emulsão tem um efeito positivo no desenvolvimento do desgaste.

Estas curvas de desgaste de flanco demostram certa tendência à formação segundo a teoria de desgaste da ferramenta, principalmente na condição de corte F (v_c = 70 m/min e f = 0,03 mm/rev), a qual provavelmente pode ser dividido em 3 estágios (região) de desgaste, nomeadamente estágio de desgaste inicial (onde o desgaste da ferramenta apresenta alta taxa de crescimento com aresta de corte nova), estágio de desgaste constante (onde a taxa do desgaste da broca para de crescer e se torna constante, o sistema de corte equilibra e estabiliza) e estágio de desgaste rápido (onde o desgaste cresce outra vez com uma taxa de desgaste elevada, ao atingir um determinado valor, a aresta de corte perde ação de corte, na interface broca-cavaco é gerado maior calor devido atrito, o que causa um rápido desgaste) (Bogdanovich, 2019; Khonsari, Ghatrehsamani e Akbarzadeh, 2021; Sharif, Abd e Sasahar, 2012; Sorgato *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2023). A localização de cada estágio pode ser feita

utilizando a técnica de monitoramento e previsão de desgaste como recomendado por Bilgili *et al*. (2023). Neste estudo, é descrita uma abordagem para monitorar o desgaste da ferramenta, visando prever limites de desgaste com base na corrente do motor do fuso e nas medições do dinamômetro. Os dados de corrente do motor do fuso, obtidos em alta frequência por meio de um dispositivo industrial avançado, são analisados, enquanto as forças de corte e o torque são registrados com um dinamômetro rotativo durante testes de furação para um número de furos selecionados. O revestimento TiAlN propaga os estágios iniciais e semi-estacionários de desgaste e retarda o estágio catastrófico (Wang *et al.*, 2012).

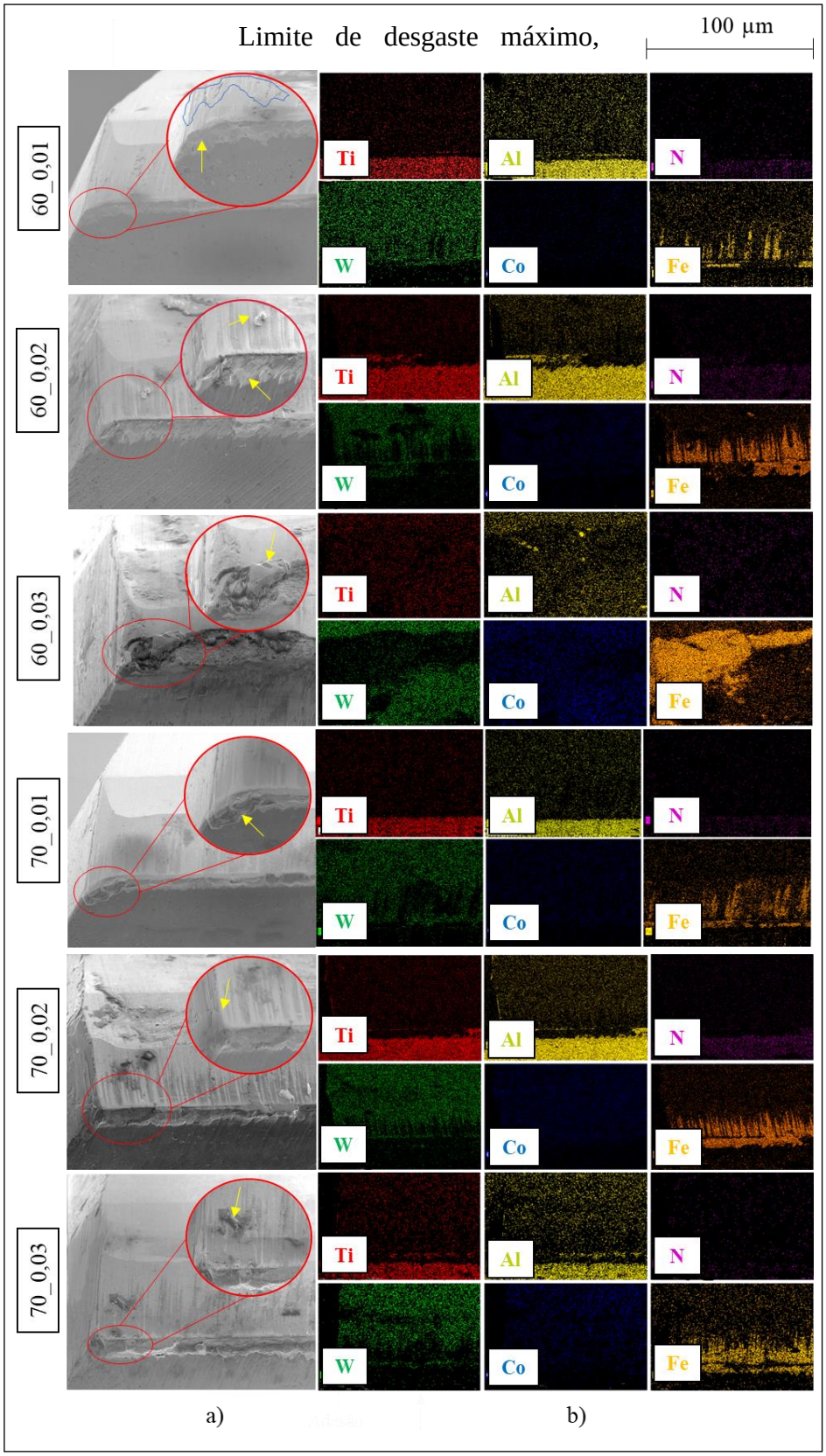
No início da furação de todas as condições de corte, ou seja, nos primeiros 250 mm de comprimento usinado, se observa uma elevada de crescimento de desgaste em relação ao comprimento posterior. Segundo explicam Biermann *et al*. (2018); Wegert *et al*. (2020a) e Wegert *et al*. (2020b) a temperatura no início do processo de furação é ligeiramente superior aos valores medidos subsequentes, depois as temperaturas continuam a aumentar até que as temperaturas diminuem novamente a partir de uma dada profundidade de furação. A razão é que no início existem diferentes condições de contato entre a pastilha e a peça que mudam continuamente. Isto resulta em uma distribuição de tensão diferente na cabeça da broca e outras forças de reação. Ou seja, a energia térmica gerada pelas guias não estão presente nesta área. Outra possível explicação é dada por Felinks *et al*. (2022) quando compararam o efeito de óleo e emulsão na entrada axial. Os autores observaram que emulsão apresenta pouco poder lubrificante nesta região, promovendo assim maior tendência adesão. Foi por isso que a emulsão na pesquisa realizada por esses autores apresentou maior desgaste de ferramenta em relação ao óleo. Porém, esse desgaste se estabilizou à medida que a profundidade aumentou. No entanto, tem-se a hipótese que neste estudo os desgastes foram maiores nos primeiros 250 mm em relação aos comprimentos posteriores. Além disso, segundo Gupta *et al*. (2022) à medida que a temperatura cresce, consequentemente reduz a dureza do material da ferramenta, resultando em forte adesão da peça e aumento do desgaste. A outra possível explicação é que a ferramenta de corte é bastante afiada no início da furação por ser nova, e quando entra em contato com outro corpo ela tende a se desgastar rapidamente no início devido ação de corte e fragilidade do estado da ferramenta.

No ensaio, a condição de corte F (v_c = 70 m/min e *f* = 0,03 mm/rev.) gerou os menores valores de desgaste médio na furação para velocidade de corte (v_c = 70 m/min) e a condição E (v_c = 60 m/min e *f* = 0,03 mm/rev.) resultou nos menores valores de desgaste para velocidade de corte (v_c = 60 m/min). Neste caso, os valores reduziram em média 6,32 % para a velocidade de corte (v_c = 70 m/min) em comparação a (v_c = 60 m/min). Por outro lado, os maiores valores de desgaste foram achados no ensaio B (v_c = 70 m/min e *f* = 0,01 mm/rev) para a velocidade de corte (v_c = 70 m/min) e a condição A (v_c = 60 m/min e *f* = 0,01 mm/rev) resultou nos maiores valores de desgaste na furação profunda para velocidade corte (v_c = 60 m/min). Aqui os valores reduziram em média 6,91% para a velocidade de corte (v_c = 70 m/min) em comparação a velocidade de corte (v_c = 60 m/min). Ou seja, os desgastes tenderam a reduzir em maiores avanços e aumentar em menores avanços independentemente da velocidade de corte. Os desgastes também tenderam a reduzir com o aumento da velocidade de corte. Análogo ao comportamento constatado aqui, Thanikasalam *et al*. (2019) realizaram uma pesquisa que em parte visava monitorar online a condição da ferramenta no processo de furação profunda, mas também observaram redução de desgaste da ferramenta quando se aumentou a taxa de avanço até um determinado valor. A provável razão para tal comportamento segundo Khan *et al*. (2017) é que a taxa de avanço mais alto não somente aumenta a espessura de cavaco como também reduz o tempo de contato entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho. Nesta mesma lógica, Thanikasalam *et al*. (2019) explicam também que a energia térmica na interface peça – ferramenta é removida com aumento da taxa de avanço. Arunkumar *et al*. (2023) alegam que a geração de calor na ferramenta é menor em avanços e velocidades de corte mais baixos. Então, essa seria um dos prováveis motivos que a condição A (v_c = 60 m/min e *f* = 0,01 mm/rev.) apresentar maior desgaste, visto que, o mecanismo que promoveu o desgaste em questão predomina em baixas temperaturas. E os desgastes tendem a reduzir com aumento da velocidade de corte, porque a velocidade de corte reduz os esforços de corte, a resistência para remover o cavaco, e o mecanismo de desgaste por adesão como explicado acima.

Para determinar o mecanismo de desgaste ocorrido nas ferramentas de corte, foi efetuado uma análise no MEV (microscópio eletrônico de varredura). Na análise de desgaste das brocas testadas, como mostra a Figura 41a, observou-se que os

mecanismos que ocasionaram o desgaste das brocas foram a aderência e a abrasão de partículas duras do material usinado sobre a superfície. Nela é possível observar que o mecanismo predominante é adesão indicadas pelas setas amarelas que aparecem em todas as condições de corte, que também foi observado por Wang *et al*. (2014) e Arunkumar *et al*. (2023). Wang *et al*. (2014) declaram que este fenômeno ocorre em alta temperatura e pressão, e a maior velocidade de corte utilizada no seu estudo foi 62,8m/min (4000 rpm). Os autores Diniz, Marcondes e Coppini (2014); Ferraresi (1977) e Stemmer (1993) apresentam uma explicação que coaduna com este resultado, a saber, que esse mecanismo acontece quando duas superfícies de metal entram em contato sob pressões moderadas, temperaturas e velocidades de cortes baixa originando micro caldeamento. Esses caldeamentos tornam-se tão resistente a um nível em que ao desprender as superfícies, ocorre a ruptura em um dos corpos metálicos, e não na região de contato. Deste modo, porções da superfície de um corpo metálico são transferidos para a outra superfície em contato. Deve ser por estes motivos que o maior desgaste adesivo ocorreu na condição de menor velocidade de corte, por ter mais tempo para soldar e até mesmo retirar material soldado como indicam as setas amarelas. Já para abrasão (ou atrito), as porções duras retiradas em outra zona da ferramenta de corte pela adesão ou até mesmo por atrito provocam o desgaste abrasivo, como exemplo observado no contorno azul. No entanto, sendo que o desgaste por adesão geralmente ocorre em baixa velocidade de corte ele também pode ocorrer em grandes velocidades.

Figura 41 – Broca canhão, emulsão em abundância, material: VTMPlus - a) MEV na aresta externa da broca e detalhe do desgaste; b) EDS



Fonte: Próprio autor

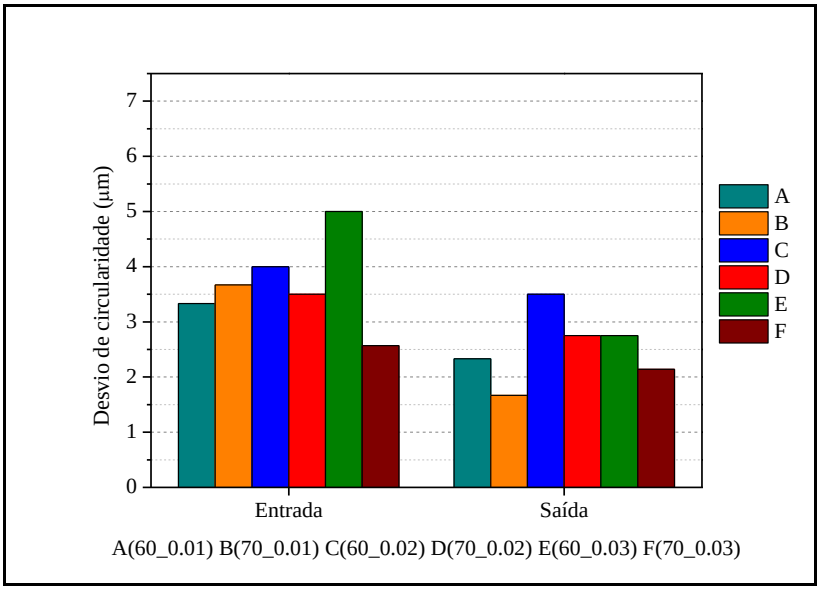
Na Figura 41b tem-se o resultado da composição química obtida por EDS. Na análise química efetuada foi possível observar a presença de ferro (Fe) na superfície e aresta da ferramenta (a cobertura ficou desgastada ao ponto que o ferro aderiu ao núcleo, comparando os mapeamentos do substrato e Fe) proveniente do aço ferramenta VTMPlus. Isso é um indicativo de que aderência seja o mecanismo causador de desgaste. A presença de elementos da peça na ferramenta em todos os ensaios é um indicativo de que a adesão não foi completamente eliminada, mesmo em maiores condições de corte. Indicando que essas maiores condições de corte não foram suficientes para eliminar a adesão.

4.2 Desvios de circularidade do furo

Os valores da medição dos desvios de circularidade de todos os ensaios desta pesquisa são apresentados na Tabela A. 2 e Tabela A. 3 (Apêndice). Os menores valores médios de circularidade nesta furação profunda ocorreram na condição F (v_c = 70 m/min, f = 0,03 mm/rev.) em que o desvio foi de 2,36 µm e os maiores ocorreram na condição E (v_c = 60 m/min, f = 0,03 mm/rev) com um desvio de 3,88 µm. Além disso, os valores de desvio médios de circularidade foram menores em condições em que a velocidade de corte é (v_c = 70 m/min) em comparação com a condição de velocidade de corte (v_c = 60 m/min), exceto na entrada em condição em que o avanço (f = 0,01 mm/rev). A razão pela qual a maior velocidade de corte e avanço apresentaram menor desvio de circularidade, provavelmente, deve ter sido pelo fato do aumento da velocidade de corte reduzir o desgaste da ferramenta, gerar menos vibrações e esforços de corte. Já os maiores valores dos desvios de circularidade podem ter sido motivados pela mais baixa velocidade de corte devido aos maiores desgastes da ferramenta, e por maior avanço ter aumentado o tamanho do cavaco que consequentemente aumenta esforço para arrancar o cavaco, instabilidade no processo e vibrações. Conforme declaram Sihvo e Varis (2010) o aumento do desgaste de ferramenta aumenta a sua vibração e instabilidade. Do mesmo modo Arunkumar *et al*. (2023) acrescentam que à medida que o desgaste aumenta essa irregularidade vai aumentando.

A Figura 42 mostra que os valores de desvio médios de circularidade tendem a ser menores na saída dos furos em todas as condições de corte em relação a entrada. Uma das possíveis explicações para tal comportamento é que no início da furação a broca canhão sofre uma certa instabilidade que gera aumento no desvio de circularidade na entrada, isso se reduz com a profundidade do furo porque a ferramenta de corte tem a tendência de se estabilizar dentro do furo de altas profundidades, diminuindo o balanço em relação à linha do centro do eixo-árvore da máquina ferramenta bem como do apoio das guias. Porém, este resultado é contrário aos resultados obtidos por Liang *et al*. (2022) onde os erros de circularidade do furo foram menores na entrada em relação a saída.

Figura 42 – Desvio médio da circularidade



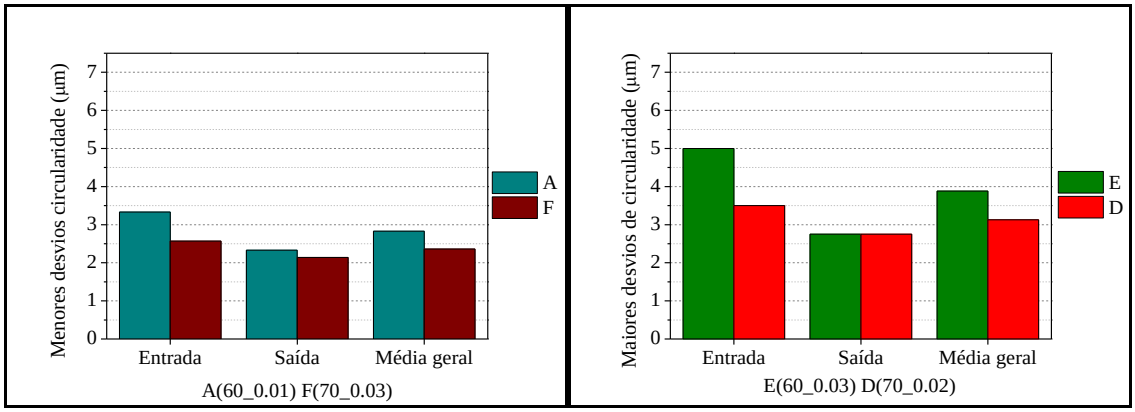
Fonte: Próprio autor

4.2.1 Menores e maiores valores médios dos desvios de circularidade de todos os ensaios.

Nos ensaios, a condição de corte A (v_c = 60 m/min e f = 0,01 mm/rev.) gerou os menores valores de desvio de circularidade na furação profunda para velocidade de corte (v_c = 60 m/min), e a condição F (v_c = 70 m/min e f = 0,03 mm/rev.) resultou nos

menores valores de desvio de circularidade na furação para velocidade de corte (v_c = 70 m/min) (Figura 43a). Neste caso, os valores reduziram em média 16,81 % para a velocidade de corte (v_c = 70 m/min) em comparação a (v_c = 60 m/min). Por outro lado, os maiores valores de desvio de circularidade foram achados no ensaio E (v_c = 60 m/min e *f* = 0,03 mm/rev.) para a velocidade de corte (v_c = 60 m/min), e a condição D (v_c = 70 m/min e *f* = 0,02 mm/rev.) resultou nos maiores valores de desvio de circularidade na furação profunda para velocidade de corte (v_c = 70 m/min) (Figura 43b). Aqui, os valores reduziram em média 19,36% para a velocidade de corte (v_c = 70 m/min) em comparação a velocidade de corte (v_c = 60 m/min).

Figura 43 – Menores e maiores valores médios das circularidades de todos os ensaios.



(a) (b)

Fonte: Próprio autor

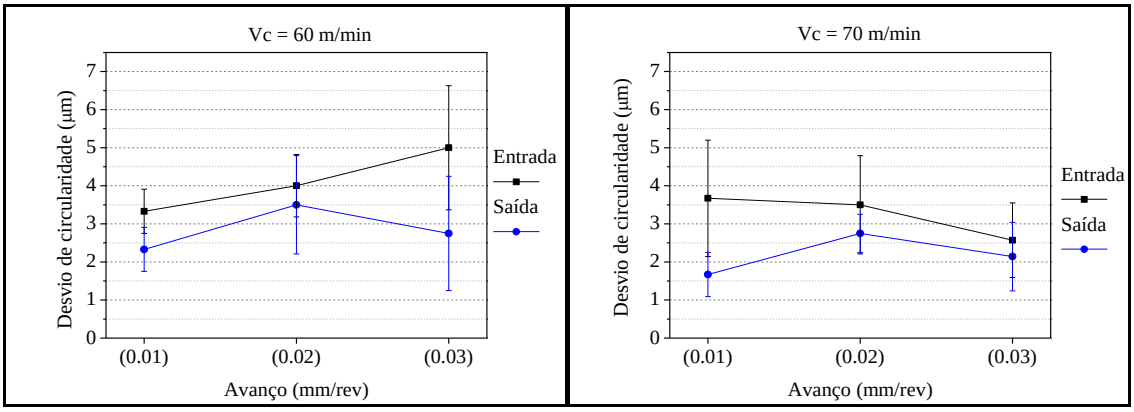
Na média das menores circularidade na Figura 43a é possível notar que a combinação entre alta velocidade de corte e avanço reduz o desvio de circularidade, enquanto baixa velocidade de corte e avanço aumenta. No estudo realizado por Arunkumar *et al*. (2018) o aumento da velocidade de corte aumentou o desvio de circularidade, devido ao aumento da taxa de remoção de cavaco. Esta grande quantidade de cavacos se desenvolveu entre a ferramenta de corte e a superfície da peça. Só que os resultados presentes são análogos aos da pesquisa alcançado pelo Thanikasalam *et al*. (2016, 2019). Thanikasalam *et al*. (2019) declaram que o aumento da velocidade do fuso reduz o desvio da circularidade, pois os menores desvios de circularidade ocorreram quando se utilizou maiores velocidade de fuso e avanço moderado, causando uma redução na taxa de remoção de cavaco e consequentemente no desvio da circularidade. Talvez esta seja a razão para diminuição do desvio da circularidade. A combinação da mais baixa velocidade e a mais alta taxa de avanço resultou no maior

valor médio do desvio de circularidade (Figura 43b). Segundo Thanikasalam e Arunkumar (2016) a taxa de avanço apresenta maior influência no desvio de circularidade. Porém, Arunkumar et. al. (2018) e Thanikasalam et. al. (2019) declaram que a velocidade do fuso produz maior efeito na circularidade seguido do avanço e pressão do fluido de corte. Neste caso o maior valor médio do desvio de circularidade foi mais influenciado pela velocidade de corte do que pelo avanço. Pois, tanto os menores quanto os maiores valores de desvio de circularidade ocorrem em taxa de avanço mais elevada (f = 0,03 mm/rev.).

4.2.2 Efeito das condições de corte no desvio de circularidade

As condições de corte influenciam nos desvios de circularidade. A Figura 44 apresenta os valores de desvio de circularidade gerados na entrada e saída dos furos para uma velocidade de corte constante 60 m/min e outra 70 m/min em função de avanço variado.

Figura 44 – Comparação dos desvios de circularidade em relação avanço com velocidade de corte a) v_c = 60 m/min e b) v_c = 70 m/min



(a) (b)

Fonte: Próprio autor

Ao analisar os desvios de circularidade nas duas velocidades de corte, com diferentes avanços nota-se na Figura 44a que aumentando a taxa de avanço de (f = 0,01 mm/rev.) para (f = 0,02 mm/rev.) e fixando a velocidade de corte (v_c = 60 m/min) o

desvio de circularidade cresceu, e depois aumentou rapidamente para (*f* = 0,03 mm/rev.) na entrada e reduziu na saída. De acordo com Thanikasalam e Arunkumar (2016) o desvio de circularidade do furo aumenta à medida que a taxa de avanço aumenta. Isso ocorre porque quando a taxa de avanço aumenta, a taxa na qual o material é removido também aumenta, causando vibrações adicionais e altas temperaturas que agravam a imprecisão da circularidade. Além disso, a taxa na qual a ferramenta penetra na peça também aumenta com o aumento da taxa de avanço, o que por sua vez causa um aumento nas deflexões do furo (Arunkumar *et al.*, 2023). Na Figura 44b nota-se que para a velocidade de corte (v_c = 70 m/min), aumentando a taxa de avanço (*f* = 0,01 mm/rev.) para (*f* = 0,02 mm/rev.) o desvio de circularidade apresentou uma ligeira redução na entrada e cresceu na saída, com aumento da taxa de avanço para (*f* = 0,03 mm/rev.) o desvio de circularidade reduziu na entrada e saída. De acordo com Liang *et al* (2022) em taxas de avanço baixas, o aumento da velocidade de avanço leva ao rápido aumento da circularidade do furo. No entanto, quando o avanço aumenta, a circularidade muda lentamente com a taxa de avanço e até mostra uma tendência decrescente. Isto pode estar relacionado à instabilidade do processo de corte causada pela flutuação da força axial da broca e pelo desgaste da ferramenta.

Uma vez que as condições de corte submetidas para a velocidade de corte (v_c = 60 m/min) são as mesmas alterando somente a velocidade de corte para (v_c = 70 m/min) comparando as duas Figura 44a e Figura 44b se observa a influência da velocidade de corte na redução do desvio de circularidade em todos os avanços corroborando com estudo realizado por Arunkumar *et al*. (2018), Thanikasalam e Arunkumar (2016) onde o aumento da taxa de avanço seguido de velocidade do fuso influenciou na redução do desvio de circularidade. Ou seja, em baixa velocidade de corte o aumento da taxa de avanço demostra uma tendência ao crescimento do desvio de circularidade, ao passo que em velocidade de corte alta o aumento da taxa de avanço demostra tendência ao decrescimento.

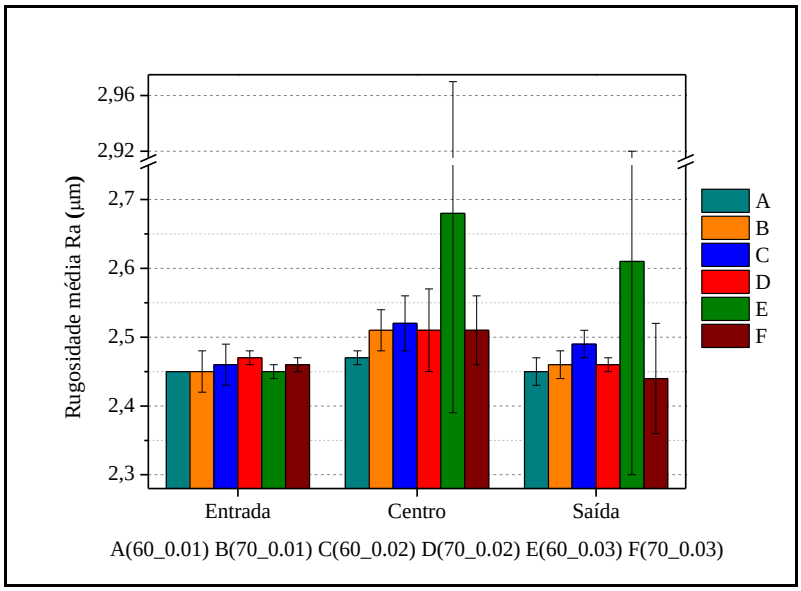
4.3 Rugosidade média (Ra)

Os resultados obtidos por meio das medições das rugosidades de todos os ensaios estão nas Tabela A. 4 e Tabela A. 5 (Apêndice). Os menores valores médios de rugosidade nesta furação profunda ocorreram na condição A (v_c = 60 m/min, *f* = 0,01 mm/rev.) em que (Ra = 2,45 µm) e os maiores ocorreram na condição E (v_c = 60 m/min, *f* = 0,03 mm/rev.) em que (Ra = 2,58 µm). Tanto os menores quanto os maiores valores médios de rugosidade ocorreram em velocidade de corte (v_c = 60 m/min). Apesar disso, os valores de rugosidade medidos tenderam a ser menores em condições em que a velocidade de corte é (v_c = 70 m/min) em comparação com a condição de velocidade corte (v_c = 60 m/min). Neste ensaio, a menor rugosidade do furo usinado foi observado na condição em que a velocidade de corte e taxa de avanço são mais baixas, similar ao resultado da pesquisa de Thanikasalam *et al*. (2019). Segundo explicam Arunkumar *et al*. (2023) em velocidade de corte e taxa de avanço mais baixas, a geração de calor na ferramenta é menor. E o avanço de corte influencia fortemente na qualidade da superfície usinada. No entanto, pode-se inferir que quando o avanço de corte aumenta a taxa de remoção de material também aumenta, e consequentemente aumenta ainda mais as vibrações e o desgaste da ferramenta. Quanto ao aumento da velocidade de corte, foi mostrada uma tendência de produzir menores rugosidade, o que corrobora com os estudos realizados por Thanikasalam e Arunkumar (2016) o qual observaram, a partir de resultados obtidos uma tendência na redução da rugosidade com aumento da velocidade de corte. Porém, Liang *et al*. (2022) e Arunkumar *et al*. (2018) observaram aumento na rugosidade com o aumento da velocidade de corte, devido principalmente à grande quantidade de cavacos que se desenvolvem entre a ferramenta de corte e a superfície da peça.

A Figura 45 mostra de modo geral os valores médios em cada posição dos furos (entrada, centro e saída) realizado em cada ensaio concernente à rugosidade média Ra. Comparando as posições medidas das duas velocidades de corte e três avanços empregados nos ensaios, os valores Ra se apresentaram menores na entrada em relação ao centro e à saída do furo. Isso se deve talvez à inicial proteção do revestimento de TiAlN na ferramenta de corte onde a aresta de corte é íntegra e afiada, e a descarga de

cavaco ocorre suavemente. Além disso, a força de corte é baixa e a deformação plástica que afeta a morfologia do cavaco durante o processo de corte é mínima neste estágio de desgaste (Wang *et al.*, 2012). À medida que a profundidade de corte vai aumentando, a broca canhão não só vai perdendo ação de corte, mas também vai alongando o caminho que o cavaco tem de percorrer para descarga, resultando nas maiores rugosidades nas posições subsequentes devido o contato entre o cavaco e superfície do furo.

Figura 45 – Valores das rugosidades médias Ra de todos os ensaios.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 45 os valores médios da rugosidade tenderam a ser maiores na entrada do furo com velocidade de corte de (v_c = 70 m/min), ao passo que no centro e saída do furo tenderam a ser maiores com velocidade de corte de (v_c = 60 m/min). Isso provavelmente se deve ao fato da entrada do furo apresentar maior instabilidade na ferramenta de corte com maiores velocidades de corte por não ter penetrado suficientemente o material da peça de trabalho. Já no centro e saída do furo, as maiores rugosidades devem ter sido influenciadas pelo desgaste da ferramenta, uma vez que a menor velocidade de corte produziu maiores desgastes na broca canhão, e nestas posições a broca canhão é mais estável, porém esta estabilidade pode ser prejudicada pelo aumento de desgaste que logo prejudica a superfície usinada.

A condição de corte E (v_c = 60 m/min, f = 0,03 mm/rev.) na Figura 45 apresenta maiores rugosidades apesar do baixo desgaste da ferramenta mostrado na Figura 40, exceto quando comparado com a condição F (v_c = 70 m/min, f = 0,03 mm/rev.). Em situações onde o desgaste da ferramenta é maior, mas a rugosidade é menor, conforme a

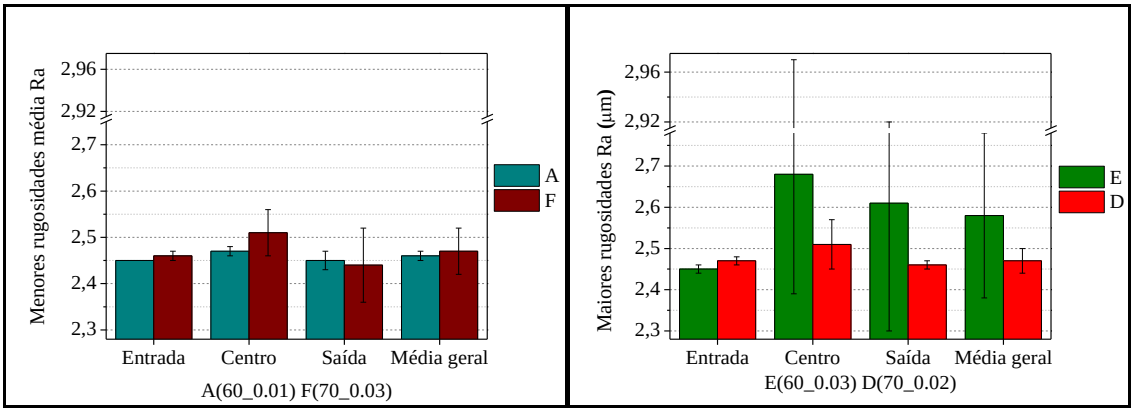
literatura de (Benardos e Vosniakos, 2003; Cunha e Cravenco, 2006; Shaw, 2005) citado no item 2.4.2, outros aspectos como a geometria da ferramenta, a estabilidade do processo de usinagem, a qualidade do material da peça, ou até mesmo a eficácia do sistema de refrigeração podem estar desempenhando um papel fundamental. Neste caso, provavelmente a geometria da ferramenta de corte pode estar contribuindo no aumento da rugosidade, pois conforme mostra a Figura 41a, o aspecto da ferramenta de corte na condição E (v_c = 60 m/min, f = 0,03 mm/rev.) está mais deteriorado.

Quando aos valores médios da rugosidade se apresentarem maiores no centro em relação a entrada e saída. A possível explicação para tal comportamento é que a descarga de cavaco é mais suave na entrada e saída em relação ao centro.

4.3.1 Menores e maiores valores médios das rugosidades Ra de todos os ensaios.

No ensaio, a condição de corte A (v_c = 60 m/min e f = 0,01 mm/rev.) gerou os menores valores de rugosidade média na furação para velocidade de corte (v_c = 60 m/min), e a condição F (v_c = 70 m/min e f = 0,03 mm/rev.) resultou nos menores valores de Ra na furação para velocidade de corte (v_c = 70 m/min) (Figura 46a). Neste caso, os valores aumentaram em média 0,49 % para a velocidade de corte (v_c = 70 m/min) em comparação a (v_c = 60 m/min). Por outro lado, os maiores valores de Ra foram achados no ensaio E (v_c = 60 m/min e f = 0,03 mm/rev.) para a velocidade de corte (v_c = 60 m/min), e a condição D (v_c = 70 m/min e f = 0,02 mm/rev.) resultou nos maiores valores de Ra na furação profunda para velocidade corte (v_c = 70 m/min) (Figura 46b). Aqui, os valores reduziram em média 4,07% para a velocidade de corte (v_c = 70 m/min) em comparação a velocidade de corte (v_c = 60 m/min).

Figura 46 – Menores e maiores valores médios das rugosidades médias Ra de todos os ensaios.



(a) (b)

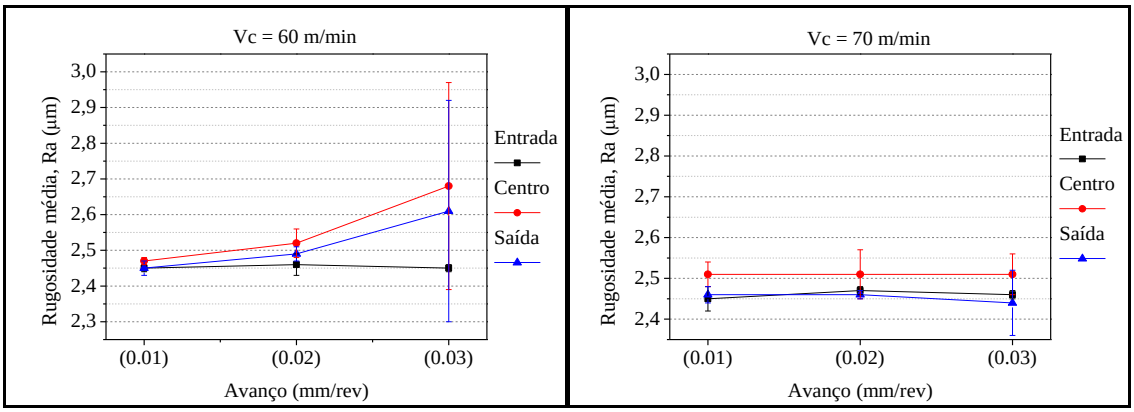
Fonte: Próprio autor

Na Figura 46a a média geral das menores rugosidades médias Ra aumentou em média 0,27 %. A redução em média de 4,07%, mostrada na Figura 46b deve ter sido motivada provavelmente pela diminuição da taxa de avanço que apresenta maior influência na rugosidade superficial e pelo aumento da velocidade de corte que reduz o esforço de corte, como explicado acima.

4.3.2 Efeito das condições de corte na rugosidade

A Figura 47 apresenta os valores de rugosidade média Ra gerados na entrada, no centro e na saída dos furos para velocidades de corte constante, uma (v_c = 60 m/min) e outra (v_c = 70 m/min) em função da variação de avanço.

Figura 47 – Comparação das rugosidades Ra em relação avanço com velocidade de corte a) v_c = 60 m/min e b) vc = 70 m/min



(a) (b)

Fonte: Próprio autor

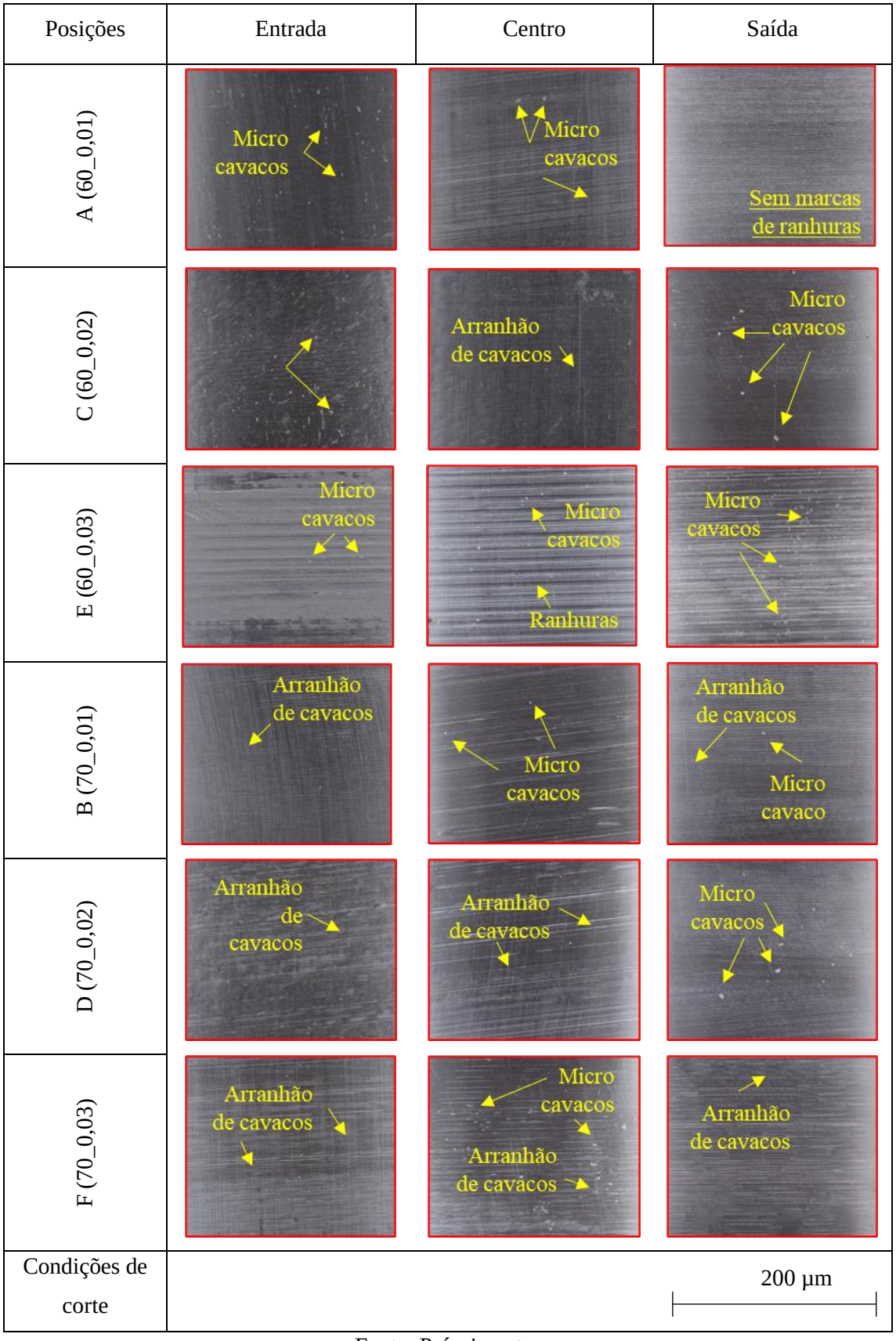
Na Figura 47a, aumentando a taxa de avanço (*f* = 0,01 mm/rev.) para (*f* = 0,02 mm/rev.) e fixando a velocidade de corte (v_c = 60 m/min), a rugosidade Ra cresceu lentamente e depois aumentou rapidamente para (*f* = 0,03 mm/rev.), exceto na entrada em que ocorreu uma redução. Pode-se inferir que a rugosidade média do furo aumenta à medida que a taxa de avanço aumenta (Thanikasalam e Arunkumar, 2016). Este resultado está alinhado com a teoria de que o aumento do avanço causa um aumento da rugosidade geométrica ou teórica (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014). Segundo explicam Liang *et al*. (2022) e Arunkumar *et al*. (2023) isso ocorre porque a espessura e o comprimento dos cavacos aumentam com aumento do avanço, resultando no aumento da dificuldade de quebra e extração dos cavacos, e também no maior atrito ou contato do cavaco com superfície do furo processado, levando ao aumento da rugosidade. Além disso, o aumento da taxa de avanço aumenta a temperatura na superfície da parede do furo, devido à ocorrência de maiores espessuras de cavacos e forças de atrito envolvidas no processo de furação (ARUNKUMAR *et al*., 2018). Já para a velocidade de corte (v_c = 70 m/min) aumentando a taxa de avanço (*f* = 0,01 mm/rev.) para (*f* = 0,02 mm/rev.) a rugosidade Ra se manteve constante no centro e na saída, mas na entrada apresentou um ligeiro aumento; com o aumento da taxa de avanço para (*f* = 0,03 mm/rev.) a rugosidade diminuiu na entrada e saída, porém foi constante no centro, Figura 47b. Aqui é possível observar como o aumento da velocidade de corte influenciou na redução das rugosidades. Corroborando com a inferência feita por Thanikasalam e Arunkumar (2016) de que a rugosidade média aumenta à medida que a taxa de avanço aumenta.

Mas não só, também pode diminuir à medida que a velocidade do fuso aumenta. A redução da rugosidade média deve ter sido influenciada pelo desgaste da ferramenta de corte, pois neste ensaio a velocidade de corte de 70 m/min apresentou menores desgastes da ferramenta, e consequentemente menores rugosidades. Assim sendo, as condições de corte e o desgaste da ferramenta têm um impacto nos danos da superfície usinada, e as principais determinantes da rugosidade da superfície usinada e da vida da ferramenta são a velocidade e o avanço (Arunkumar *et al.*, 2023). E os comportamentos diferentes apresentados nas entradas das Figura 47a e Figura 47b podem ter sido motivados pela instabilidade do processo nesta posição.

4.3.3 Superfície da parede do furo usinado

A Figura 48 apresenta o estado das superfícies da parede do furo usinado no final da furação de todas as condições de corte utilizadas nos ensaios e nas três posições medidas, a saber entrada, centro e saída.

Figura 48 – Superfícies da parede do furo usinado no final da furação



Fonte: Próprio autor

As superfícies internas dos furos, mostradas nas imagens da Figura 50, mostram defeitos superficiais, como riscos de cavacos, adesão de micro cavacos, ranhuras ao longo do eixo. Isso se deve principalmente à falha na remoção dos cavacos, devido à baixa pressão do fluido de corte. Com o aumento da pressão do fluido de corte, os cavacos podem ser descarregados suavemente e o fenômeno de arranhões e colagem de cavacos é reduzido. (Liang *et al.*, 2022). Talvez seja por isso que esses defeitos da superfície aqui foram menores em relação aos observados por Liang *et al*. (2022) porque utilizaram a pressão 40 bar (4MPA) que é menor do 68,6 bar. Segundo Chetan *et al*. (2019) e Arunkumar *et al*. (2023) as partículas do cavaco aderem à superfície usinada por falta de filme lubrificante na zona de corte e isso leva a defeitos na superfície da peça. As elevadas ranhuras na condição E (v_c = 60 m/min e f = 0,03 mm/rev.) deve ter sido motiva pelo estado comprometido da aresta de corte, conforme observado na análise de MEV na Figura 41a.

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa observou que tanto da velocidade de corte quanto de avanço influênciam no desgaste da ferramenta, circularidade do furo e na rugosidade superficial.

Ao se analisar o desgaste da ferramenta, desvio de circularidade e rugosidade superficial sob condição de corte, se constatou que:

5.1 Desgaste da ferramenta

- Os valores de desgaste da ferramenta medidos tendem a reduzir quando se aumento velocidade de corte e se mantem fixo o avanço.
- Os menores valores de desgaste da ferramenta de corte foram gerados em maiores avanço 0,03 mm/rev. E, para as duas as velocidades de cortes 70 m/min foi em média 6,32 % menor do que 60 m/min, ou seja, VB = 0,22 mm.
- Os maiores valores de desgaste da ferramenta de corte foram gerados em menores avanço 0,01 mm/rev. E, para as duas as velocidades de cortes 70 m/min foi em média 6,91 % menor do que 60 m/min, ou seja, VB = 0,28 mm;
- Observou-se que os mecanismos causadores do desgaste de flanco foram aderência e abrasão. Adesão foi o mecanismo predominante. E o elemento aderido na ferramenta de corte foi o ferro (Fe), proveniente do aço ferramenta VTMPlus.

5.2 Desvio de Circularidade do furo

- Os valores de desvio médios de circularidade tendem a ser menores na saída do furo em todas a condições de corte.
- Os menores valores de desvio de circularidade são gerados em menores avanço 0,01 mm/rev. para velocidade de corte 60 m/min e em maiores avanços 0,03 mm/rev. para velocidade de corte 70 m/min. E, para as duas as velocidades de

cortes 70 m/min foi em média 16,81% menor do que 60 m/min, ou seja, desvio de circularidade foi de 2,5 µm;

- Os maiores valores de desvio de circularidade são gerados em maiores avanço 0,03 mm/rev. para velocidade de corte 60 m/min e em avanços moderados 0,02 mm/rev. para velocidade de corte 70 m/min. E, para as duas as velocidades de cortes 70 m/min foi em média 19,36 % menor do que 60 m/min, ou seja, desvio de circularidade foi de 3,88 µm;
- Para as duas velocidades de corte tanto na entrada quanto na saída o aumento da taxa de avanço de 0,01 para 0,02 mm/ver. o desvio de circularidade tende aumentar, porém reduz quando é aumentado para 0,03 mm/rev.
- O desvio de circularidade aumenta com aumento do desgaste da ferramenta.

5.3 Rugosidade Ra

- Os valores de médios da rugosidade superficial do furo foram menores na entrada do furo em relação ao centro e a saída.
- Os menores valores de rugosidade da superfície são gerados em menores avanço 0,01 mm/rev. para velocidade de corte 60 m/min e em maiores avanços 0,03 mm/rev. para velocidade de corte 70 m/min. E, para as duas as velocidades de cortes 70 m/min foi em média 0,49 % maior do que 60 m/min, ou seja, a rugosidade da superfície foi de 2,45 µm;
- Os maiores valores de rugosidade da superfície são gerados em maiores avanço 0,03 mm/rev. para velocidade de corte 60 m/min e em avanços moderados 0,02 mm/rev. para velocidade de corte 70 m/min. E, para as duas as velocidades de cortes 70 m/min foi em média 4,07 % menor do que 60 m/min, ou seja, a rugosidade da superfície foi de 2,58 µm;
- A rugosidade da superfície tende aumentar com aumento da taxa de avanço em velocidade de corte 60 m/min e reduz com a velocidade de corte 70 m/min;
- A rugosidade da superfície aumenta com aumento do desgaste da ferramenta.
- As superfícies interna do furo mostram defeitos superficiais, como arranhões de cavacos, colagem de micro cavacos, ranhuras ao longo do eixo. Isso se deve

principalmente à falha na remoção dos cavacos a tempo e a falta de filme lubrificante na zona de corte.

Paritu-se da hipotese de que os fatores que mais influenciam na rugosidade superficial e desvio de circularidade são velocidade de corte, avanço, e desgaste da ferramenta de corte. E a na análise dos resultados se observa a confirmação desta hipótese.

E a melhor condição de corte utilizada nesta pesquisa que pode elevar a produção sem muito prejudicar o desgaste da ferramenta de corte, desvio de circularidade e a rugosidade do furo é velocidade de corte 70 m/min e avanço 0,03 mm/rev. Pois, na ferramenta de corte apresentou menor valores de desgaste da ferramenta, e na qualidade do furo apresentou os menores valores médio de desvio de circularidade e o segundo menor valor de rugosidade média Ra e relação a mais baixa com uma diferença de apenas 0,27 %, e pela sua alta taxa de avanço reduziu o tempo de contato.

Este trabalho foi realizado baseando-se na pesquisa bibliográfica e experimental. Diante da metodologia proposta houve muitas dificuldades em encontrar materiais que abordam sobre assunto em questão, não só, percebe-se que o trabalho poderia ter sido realizado com uma pesquisa mais ampla, para se analisar a variação de temperatura na parede do furo, aceleração e esforços de corte ao longo da furação. Também houve dificuldade para encontrar de máquinas-ferramenta que realizasse furos profundo com capacidade de abastecimento de fluido de corte com uma vazão de 25 l/min e pressão de 68,6 bar para as repetições.

5.4 Propostas Para Pesquisas Futuras

- Analisar a influência da temperatura da parede do furo na qualidade do furo usinado com as condições de corte utilizadas neste trabalho em cada região;
- Investigar o comportamento das ferramentas de corte com a variação de geometrias, empregando as condições de corte do presente trabalho.
- Repetir o experimento deste trabalho para se observar se realmente o desgaste e qualidade de furo melhoram com aumento da velocidade de corte e avanço.

- Repetir o experimento deste trabalho para se observar como a formação de cavaco e a taxa de remoção do material influenciam na rugosidade superficial e circularidade com variação de velocidade de corte e taxa de avanço.
- Estudar sobre a influência dos esforços de corte no desgaste, desvio de circularidade e rugosidade de superfície.
- Analisar a influência das condições de corte no desgaste da ferramenta em outros processos de usinagem usinando aço VTMPLUS com inserto de metal duro revestido de TiAlN, para se verificar se o desgaste da ferramenta também reduz com aumento da velocidade de corte.
- Avaliar a influência da variação de mais condições de aplicação do fluido de corte (vazão e pressão) na qualidade do furo.
- Análise da força de avanço no desenvolvimento do processo.

REFERÊNCIAS

ABELE, E.; ELLERMEIER, A.; HOHENSTEIN, J.; TSCHANNERL, M. Tool length influence on wear behaviour of twisted carbide drills. **Production Engineering**, v. 1, n. 1, p. 51–56, 2 ago. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175**: Usinagem – Processos Mecânicos. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=337411>. Acesso em: 13 out. 2023

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, D. S. A. C.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1977.

ALVES, R. R. **Análise do Fresamento Frontal de Ferro Fundido Vermicular**. 2010. 99f. Tese (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.

ANURYEV, V. I. **Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya**. 8. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2001. v. 1.

ARUNKUMAR, N.; GANESH, M.; RAJARAM, M.; SARAVANA KUMAR, E. Deep hole drilling of AISI 1045: effect on hole quality & tool wear under flood, emulsion, and mist cooling technique. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 45, n. 4, p. 194–208, 9 abr. 2023.

ARUNKUMAR, N.; THANIKASALAM, A.; SANKARANARAYANAN, V.; SENTHILKUMAR, E. Parametric optimization of deep-hole drilling on AISI 1045 steel and online tool condition monitoring using an accelerometer. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 33, n. 16, p. 1751–1764, 10 dez. 2018.

ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal Cutting:** Tribology and interface engineering series. 1. ed. London: Elsevier, 2006. v. 5.

ASTAKHOV, Viktor P. Drilling. In: Modern Machining Technology. **Woodhead Publishing**, 2011a. p. 79-212.

ASTAKHOV, Viktor P. Turning. In: Modern machining technology. **Woodhead Publishing**, 2011b. p. 1-78.

ASTAKHOV, V. P. **Drills: Science and Technology of Advanced Operations.** London: CRC Press, 2014.

ASTAKHOV, V. P.; GALITSKY, V. V. Tool life testing in gundrilling: an application of the group method of data handling (GMDH). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 4–5, p. 509–517, abr. 2005.

BARRIOS, D. B.; PIVETTA, L. A.; YOSHIKAWA, N. K. **Mecânica: Métodos e processos industriais**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011. v. 5.

BECKERT, S. F.; VALENTINA, L. V. O. D.; MICHELS, R.; FALEIROS, E.; CAMPOS, W. DE; FURTADO, M. Contribuições para aplicação das normas atualizadas de rugosidade. In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. ABCM**, 2012. p. 1-8.

BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 833–844, jun. 2003.

BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook, Two Volume Set**. 1. ed. CRC Press, 2000. v. 2

BIERMANN, D.; BLEICHER, F.; HEISEL, U.; KLOCKE, F.; MÖHRING, H. C.; SHIH, A. Deep hole drilling. **CIRP Annals**, v. 67, n. 2, p. 673–694, 1 jan. 2018.

BIERMANN, D.; KIRSCHNER, M. Experimental investigations on single-lip deep hole drilling of superalloy Inconel 718 with small diameters. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 20, p. 332–339, out. 2015.

BILGILI, D.; KECIBAS, G.; BESIROVA, C.; CHEHREHZAD, M. R.; BURUN, G.; PEHLIVAN, T.; URESIN, U.; EMEKLI, E.; LAZOGLU, I. Tool flank wear prediction using high-frequency machine data from industrial edge device. **Procedia CIRP**, v. 118, p. 483–488, 2023.

BOGDANOVICH, A. V. Lows of Wear Process of the Friction Pair “0.45% Carbon Steel - Polytetrafluoroethylene” during Sliding from the Position of Fracture Mechanics. **World Journal of Mechanics**, v. 09, n. 05, p. 95–104, 5 maio 2019.

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

BOTEK. **Deep hole drilling systems**: solid carbide tools. Germany, 2015.

CASTILLA, L. E. M. **Structured surface on drilling cutting tools to improve cutting performance**. Master of Philosophy - School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester (United Kingdom), Manchester, 2015.

CASTILLO, W. J. G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com Brocas de de metal-duro com canais retos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,2005.

CHANDAR, J. B.; NAGARAJAN, L.; KUMAR, M. S. Recent research progress in deep hole drilling process: a review. **Surface Review and Letters**, v. 28, n. 11, p. 1–21, 14 nov. 2021.

CHAUDHARI, A.; SANKARANARAYANASAMY, M.; KUMAR, A. S. Surface texturing for improved tribological performance in deep hole drilling. In: Machining and Tribology. **Elsevier**, 2022. p. 239–258.

CHETAN; GHOSH, S.; RAO, P. V. Comparison between sustainable cryogenic techniques and nano-MQL cooling mode in turning of nickel-based alloy. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 1036–1049, set. 2019.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, Ltda, 1986. v. 2

CUNHA, L. S.; CRAVENCO, M. P. **Manual prático do mecânico**. [s.l.] Hemus, 2006.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8589**: Manufacturing processes chip removal. Germany, 2003.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Artlibert, 2014.

ELERIAN, F.; HELAL, W. M. K.; ABOUELEAZ, M. Methods of Roundness Measurement: An Experimental Comparative Study. **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**, v. 44, n. 9, p. 173–183, 2021.

FELINKS, N.; RINSCHEDE, T.; BIERMANN, D.; STANGIER, D.; TILLMANN, W.; FUSS, M.; ABRAHAMS, H. Investigation into deep hole drilling of austenitic steel with advanced tool solutions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 118, n. 3–4, p. 1087–1100, 13 jan. 2022.

FERRARESI, D. **Fundamentos de usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1970.

FERRARESI, D. **Fundamentos de usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1977.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GORELOVA, A.; KRISTAL, M. The deep hole boring tool. **Metal Working and Material Science**, n. 3, p. 75–81, 15 set. 2015.

GOSUDARSTVENNY STANDART. **GOST 25142-82:** Sherokhovatost' poverkhnosti: Terminy i opredeleniya. Moscow, 2018. Disponível em: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294829/4294829265.pdf>. Acesso em: 15 out. 2023

GRIFFITHS, B. J. Deep hole drilling and boring: A review of current processes and their applications. **Production Engineer**, v. 54, n. 2, p. 97–105, fev. 1975.

GUHRING. **Deep hole drilling toolsCatalog.** Germany, 2020.

GUPTA, M. K.; NIESŁONY, P.; SARIKAYA, M.; KORKMAZ, M. E.; KUNTOĞLU, M.; KRÓLCZYK, G. M.; JAMIL, M. Tool wear patterns and their promoting mechanisms in hybrid cooling assisted machining of titanium Ti-3Al-2.5V/grade 9 alloy. **Tribology International**, v. 174, p. 107773–107786, out. 2022.

ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 513:** Application of carbides for machining by chip removal - Designation of the main groups of chip removal and groups of application, 1975. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/4572/5121b45136074864bcb479ea5da763c9/ISO-513-1975.pdf>. Acesso em: 13 out. 2023

ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 513/2004E:** Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges — Designation of the main groups and groups of application, 2004. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/9120b72b-8266-4d31-ba1b-a050c8b7d674/iso-513-2004>. Acesso em: 13 out. 2023

ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685:** Tool-life testing with sigle point turnig tools, 1993. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Krahmer/post/how_do_measure_tool_insert_wear/attachment/5a27cb07b53d2f0bba421018/AS%3A568520758042624%401512557319012/download/iso+3685.pdf>. Acesso em: 13 out. 2023

JANUSIEWICZ, A.; ADAMCZAK, S.; MAKIEŁA, W.; STPIEŃ, K. Determining the theoretical method error during an on-machine roundness measurement. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 44, n. 9, p. 1761–1767, nov. 2011.

JUNG, J.; NI, J. Prediction of Coolant Pressure and Volume Flow Rate in the Gundrilling Process. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 125, n. 4, p. 696–702, 1 nov. 2003.

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

KHAN, S. A.; NAZIR, A.; MUGHAL, M. P.; SALEEM, M. Q.; HUSSAIN, A.; GHULAM, Z. Deep hole drilling of AISI 1045 via high-speed steel twist drills: evaluation of tool wear and hole quality. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, n. 1–4, p. 1115–1125, 7 out. 2017.

KHONSARI, M. M.; GHATREHSAMANI, S.; AKBARZADEH, S. On the running-in nature of metallic tribo-components: A review. **Wear**, p. 474–475, jun. 2021.

KIRSCHNER, M.; MICHEL, S.; BERGER, S.; BIERMANN, D.; DEBUS, J.; BRAUKMANN, D.; BAYER, M. In situ chip formation analyses in micro single-lip and twist deep hole drilling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 2315–2324, 22 mar. 2018.

LACALLE, L. N. L. DE; FERNÁNDEZ, A.; OLVERA, D.; LAMIKIZ, A.; OLVERA, D.; RODRÍGUEZ, C.; ELIAS, A. Monitoring deep twist drilling for a rapid manufacturing of light high-strength parts. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, n. 7, p. 2745–2752, out. 2011.

LAWAL, S. A.; CHOUDHURY, I. A.; NUKMAN, Y. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 210–221, fev. 2013.

LI, L.; HE, N.; HAO, X.; YANG, Y. Deep-hole gun drilling mechanics model of Ti6Al4V alloy based on Johnson and Cook flow stress model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 9–12, p. 4497–4508, 24 out. 2019.

LIANG, J.; JIAO, L.; YAN, P.; CHENG, M.; QIU, T.; WANG, X. Research on Deep-Hole Drilling of High-Strength Steel Using Slender Gun Drill. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 23, n. 8, p. 853–868, 1 ago. 2022.

MACHADO, A. R. *ET AL.*; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. C.; SILVA, M. B. DA. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

MAIA, R. **Tecnologia mecânica/Tecnologia de processos 10**. [s.l.] Edições Reditep Lda, 2012.

NAKAYAMA, K.; ARAI, M. Burr Formation in Metal Cutting. **CIRP Annals**, v. 36, n. 1, p. 33–36, 1987.

NEO, D. W. K.; LIU, K.; KUMAR, A. S. High throughput deep-hole drilling of Inconel 718 using PCBN gun drill. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 57, p. 302–311, set. 2020.

PAZIANI, F. T. **Desenvolvimento de um sistema automatizado e dedicado de medição.** 2005. Tese (Doutorado) - Escola de engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

RAJ, R. C. B.; ANAND RONALD, B.; VELAYUDHAM, A.; NAYAK, P. K. Hole Accuracy during Deep Hole Drilling for Hydraulic Cylinder Application. **Advanced Materials Research**, v. 984–985, p. 67–72, jul. 2014.

RICCARDO, G.; RIVOLTA, B.; GORLA, C.; CONCLI, F. Cyclic behavior and fatigue resistance of AISI H11 and AISI H13 tool steels. **Engineering Failure Analysis**, v. 121, p. 1–13, mar. 2021.

SAIF, Y.; YUSOF, Y.; LATIF, K.; KADIR, A. Z. A.; AHMED, M. BINTI LLIYAS; ADAM, A.; HATEM, N.; MEMON, D. A. Roundness Holes' Measurement for milled workpiece using machine vision inspection system based on IoT structure: A case study. **Measurement**, v. 195, p. 111072–111084, maio 2022.

SANDVIK. **Furação profunda:** Catálogo de produtos e guia de aplicação, 2003.

SANDIVIK. **Treinamento:** Tecnologia de usinagem, 2017. Disponível em: <https://www.tungsfer.com.br/wp-content/uploads/2022/02/treinamento-catalogo.pdf>. Acesso em: 12 out. 2023

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

SEVERINO, A. J. **Metodologia do Trabalho Científico**. São Paulo: Cortez, 2014.

SHARIF, S.; ABD, E.; SASAHAR, H. Machinability of Titanium Alloys in Drilling **Titanium Alloys - Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications**, n.3, p.117-138, 2012.

SHAW, M. **Metal Cutting Principles**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SHETH, S.; GEORGE, P. M. Experimental investigation, prediction and optimization of cylindricity and perpendicularity during drilling of WCB material using grey relational analysis. **Precision Engineering**, v. 45, p. 33–43, jul. 2016.

SIDDIQUEE, A. N.; KHAN, Z. A.; GOEL, P.; KUMAR, M.; AGARWAL, G.; KHAN, N. Z. Optimization of Deep Drilling Process Parameters of AISI 321 Steel Using Taguchi Method. **Procedia Materials Science**, v. 6, p. 1217–1225, 2014.

SIHVO, I.; VARIS, J. The wear of single flute gun drill and tool life tests. **Mechanical tecnologies**, v. 5, n. 73, p. 59–64, 2008.

SIHVO, I.; VARIS, J. Estimation of tool wear of a gun drill using the signal curve pattern of feed force. **Mechanical technologies**, v. 81, n. 1, p. 71–78, 2010.

SILVEIRA, M. L.; REZENDE, B. A. Furação de material sanduíche empregando brocas com geometrias diferentes: construção de modelo matemático para previsão da força de avanço. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 3, p. 0397–0402, 4 set. 2020.

SMITH, G. T. **Cutting Tool Technology**. London: Springer, 2008.

SORGATO, M.; BERTOLINI, R.; GHIOTTI, A.; BRUSCHI, S. Tool wear assessment when drilling AISI H13 tool steel multilayered claddings. **Wear**, v. 524–525, p. 524–525, jul. 2023.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 1993.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**. 3. ed. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016.

SUI, W.; ZHANG, D. Four Methods for Roundness Evaluation. **Physics Procedia**, v. 24, p. 2159–2164, 2012.

TABENKIN, A. N.; TARASOV, B.; STEPANOV, S. N. **Sherokhovatost', volnistost', profil':** Mezhdunarodnyy opyt. Sankt-Peterburg: Politekhnicheskogo Universiteta, 2007.

TEIXEIRA, C. R. **Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos furos produzidos**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995

THANIKASALAM, A.; ARUNKUMAR, N. Effect of Process Parameters on Surface Roughness and Roundness Error for Deep-hole Drilling of AISI 1045 Steel. **International Journal of Printing, Packaging & Allied Sciences**, v. 4, n. 5, p. 3413–3418, dez. 2016.

THANIKASALAM, A.; ARUNKUMAR, N.; VIJAYARAJ, R.; SANKARANARAYANAN, V.; SENTHILKUMAR, E. Online Tool Condition Monitoring And Optimizing Of Process Parameters For Surface Integrity And Hole Quality In Deep Hole Drilling Process. **Journal of the Balkan Tribological Association**, v. 25, n. 1, p. 1–30, 2019.

TIAN, H.-H.; WANG, Y.-X.; WANG, H.-X. Effect of Eccentricity on Roundness Measurement Accuracy for Cylindrical Components with Large Radius. **MAPAN**, v. 35, n. 3, p. 317–322, 7 set. 2020.

TÖNSHOFF, H. K.; SPINTIG, W.; KÖNIG, W.; NEISES, A. Machining of Holes Developments in Drilling Technology. **CIRP Annals**, v. 43, n. 2, p. 551–561, 1994.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. [s.l.] Butterworth–Heinemann, 2000.

TROITSKIY, N. D. **Glubokoye sverleniye**. Leniigrad: Mashinostroyeniye, 1971.

TUNGALOY. **Golovki so smennymi plastinami:** BTA - Glubokoye sverleniye, 2020.

VINNIKOV, I. Z.; FRENKEL, M. I. **Sverlovshchik**. 2. ed. Moskva: Vysshaya shkola, 1971.

WANG, Y.; JIA, W.; ZHANG, J. The force system and performance of the welding carbide gun drill to cut AISI 1045 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 9–12, p. 1431–1443, 3 out. 2014.

WANG, Y.; YAN, X.; LI, B.; TU, G. The study on the chip formation and wear behavior for drilling forged steel S48CS1V with TiAlN-coated gun drill. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 30, n. 1, p. 200–207, jan. 2012.

WEGERT, R.; GUSKI, V.; MÖHRING, H.-C.; SCHMAUDER, S. Temperature monitoring in the subsurface during single lip deep hole drilling. **tm - Technisches Messen**, v. 87, n. 12, p. 757–767, 18 nov. 2020.

WEGERT, R.; GUSKI, V.; SCHMAUDER, S.; MÖHRING, H.-C. Effects on surface and peripheral zone during single lip deep hole drilling. **Procedia CIRP**, v. 87, p. 113–118, 2020.

XIE, C.; LI, L.; ZHANG, Y.; LOU, J.; PAN, Y. Analysis of machining quality of 304 stainless steel deep hole by changing angle of gun drill. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 123, n. 1–2, p. 287–298, 1 nov. 2022.

YANG, C.; SHI, Y.; XIN, H.; ZHAO, T.; ZHANG, N.; XIAN, C. Tool wear prediction model based on wear infuence factor. **Research square**, p. 1–22, 2023.

ZABEL, A. Deep Hole Drilling with Small Diameters. **CIRP Encyclopedia of Production Engineering.** Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 371-379.

ZABEL, A.; HEILMANN, M. Deep hole drilling using tools with small diameters—Process analysis and process design. **CIRP Annals**, v. 61, n. 1, p. 111–114, 2012.

ZHANG, K.; CHENG, G.; ZHANG, W. Evaluation of roundness error uncertainty by a Bayesian dynamic model. **Measurement**, v. 155, p. 107565–107576, abr. 2020.

ZHANG, X.; TNAY, G. L.; LIU, K.; KUMAR, A. S. Effect of apex offset inconsistency on hole straightness deviation in deep hole gun drilling of Inconel 718. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 125, p. 123–132, fev. 2018.

APÊNDICE A – Valores medidos dos desgastes da broca canhão, rugosidades e circularidades

Na Tabela A. 1 são apresentados todos os valores dos desgastes da broca canhão medidos em cada ensaio de acordo com a condição de corte, a Tabela A. 2 apresenta todos os valores de desvio das circularidades medidos no furo em cada ensaio e Tabela A. 3 mostra os valores das médias dos desvios das circularidades dos ensaios, a Tabela A. 4 apresenta todos os valores da rugosidade Ra medidos no furo em cada ensaio e a Tabela A. 5 mostra os valores das médias das rugosidades Ra dos ensaios.

Tabela A. 1 – Valores dos desgastes da broca canhão dos ensaios

Condições de corte v_c**, m/min** ***f*****, mm/min**	**Números de furos**						
	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4	Furo 5	Furo 6	Furo 7
	Comprimento de usinado, mm						
	250	500	750	1000	1250	1500	1750
	Desgastes de flanco (VB), mm						
60_0,01	217	288	334	x	x	x	x
Desvio padrão	0,008	0,011	0,006	x	x	x	x
70_0,01	190	257	334	x	x	x	x
Desvio padrão	0,012	0,005	0,014	x	x	x	x
60_0,02	140	211	289	331	x	x	x
Desvio padrão	0,008	0,003	0,004	0,007	x	x	x
70_0,02	178	229	244	336	x	x	x
Desvio padrão	0,007	0,010	0,011	0,009	x	x	x
60_0,03	126	191	288	313	x	x	x
Desvio padrão	0,006	0,007	0,009	0,010	x	x	x
70_0,03	116	156	191	215	252	295	330
Desvio padrão	0,003	0,010	0,005	0,008	0,004	0,011	0,012

Tabela A. 2 – Valores dos desvios de circularidades dos ensaios.

Condições de corte v_c, m/min *f*, mm/min	**Posições**	**Números de furos**						
		Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4	Furo 5	Furo 6	Furo 7
		Comprimento de usinado, mm						
		250	500	750	1000	1250	1500	1750
		Circularidade, µm						
60_0,01	Entrada	4,00	3,00	3,00	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,004	0,003	0,003	x	x	x	x
	Saída	2,00	2,00	3,00	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,002	0,002	0,003	x	x	x	x
70_0,01	Entrada	2,00	5,00	4,00	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,002	0,005	0,004	x	x	x	x
	Saída	2,00	2,00	1,00	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,002	0,002	0,001	x	x	x	x
60_0,02	Entrada	3,00	4,00	4,00	5,00	x	x	x
	Desvio padrão	0,003	0,004	0,004	0,005	x	x	x
	Saída	5,00	3,00	4,00	2,00	x	x	x
	Desvio padrão	0,005	0,003	0,004	0,002	x	x	x
70_0,02	Entrada	3,00	5,00	2,00	4,00	x	x	x
	Desvio padrão	0,003	0,005	0,002	0,004	x	x	x
	Saída	2,00	3,00	3,00	3,00	x	x	x
	Desvio padrão	0,002	0,003	0,003	0,003	x	x	x
60_0,03	Entrada	5,00	3,00	5,00	7,00	x	x	x
	Desvio padrão	0,005	0,003	0,005	0,007	x	x	x
	Saída	1,00	4,00	4,00	2,00	x	x	x
	Desvio padrão	0,001	0,004	0,004	0,002	x	x	x
70_0,03	Entrada	2,00	3,00	3,00	4,00	2,00	3,00	1,00
	Desvio padrão	0,002	0,003	0,003	0,004	0,002	0,003	0,001
	Saída	3,00	3,00	3,00	1,00	2,00	1,00	2,00
	Desvio padrão	0,003	0,003	0,003	0,001	0,002	0,001	0,002

Tabela A. 3 – Valores das médias dos desvios de circularidades dos ensaios.

Condições de corte	**Médias das circularidades**			
v_c, m/min; *f*, mm/min	Entrada	Desvio padrão	Saída	Desvio padrão
60_0,01	3,33	0,58	2,33	0,58
70_0,01	3,67	1,53	1,67	0,58
60_0,02	4,00	0,82	3,50	1,29
70_0,02	3,50	1,29	2,75	0,50
60_0,03	5,00	1,63	2,75	1,50
70_0,03	2,57	0,98	2,14	0,90

Tabela A. 4 – Valores das rugosidades Ra dos ensaios.

Condições de corte v_c, m/min *f*, mm/min	**Posições**	**Números de furos**						
		Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4	Furo 5	Furo 6	Furo 7
		Comprimento de usinado, mm						
		250	500	750	1000	1250	1500	1750
		Circularidade, µm						
60_0,01	Entrada	2,45	2,45	2,45	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,02	0,09	0,02	x	x	x	x
	Centro	2,48	2,46	2,46	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,03	0,04	0,01	x	x	x	x
	Saída	2,47	2,44	2,45	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,01	0,01	0,01	x	x	x	x
70_0,01	Entrada	2,48	2,44	2,43	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,02	0,02	0,01	x	x	x	x
	Centro	2,49	2,54	2,49	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,04	0,11	0,03	x	x	x	x
	Saída	2,45	2,45	2,48	x	x	x	x
	Desvio padrão	0,01	0,02	0,01	x	x	x	x
60_0,02	Entrada	2,43	2,45	2,46	2,49	x	x	x
	Desvio padrão	0,07	0,01	0,03	0,04	x	x	x

	Centro	2,55	2,54	2,52	2,46	x	x	x
	Desvio padrão	0,02	0,01	0,01	0,03	x	x	x
	Saída	2,47	2,49	2,47	2,51	x	x	x
	Desvio padrão	0,03	0,03	0,01	0,01	x	x	x
70_0,02	Entrada	2,46	2,46	2,48	2,47	x	x	x
	Desvio padrão	0,02	0,01	0,02	0,02	x	x	x
	Centro	2,47	2,58	2,54	2,45	x	x	x
	Desvio padrão	0,03	0,05	0,07	0,03	x	x	x
	Saída	2,47	2,45	2,44	2,45	x	x	x
	Desvio padrão	0,05	0,01	0,01	0,04	x	x	x
60_0,03	Entrada	2,45	2,44	2,45	2,46	x	x	x
	Desvio padrão	0,02	0,01	0,03	0,02	x	x	x
	Centro	2,63	2,47	2,52	3,11	x	x	x
	Desvio padrão	0,04	0,03	0,01	0,04	x	x	x
	Saída	2,47	2,44	2,46	3,08	x	x	x
	Desvio padrão	0,02	0,01	0,03	0,04	x	x	x
70_0,03	Entrada	2,45	2,45	2,46	2,46	2,46	2,48	2,44
	Desvio padrão	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Centro	2,45	2,47	2,56	2,55	2,48	2,57	2,46
	Desvio padrão	0,04	0,03	0,12	0,03	0,07	0,09	0,04
	Saída	2,44	2,51	2,51	2,45	2,42	2,49	2,28
	Desvio padrão	0,01	0,03	0,01	0,04	0,02	0,02	0,03

Tabela A. 5 – Valores das médias das rugosidades Ra dos ensaios.

Condições de corte v_c, m/min; *f*, mm/min	**Médias das circularidades**					
	Entrada	Desvio padrão	Centro	Desvio padrão	Saída	Desvio padrão
60_0,01	2,45	0	2,47	0,01	2,45	0,02
70_0,01	2,45	0,03	2,51	0,01	2,46	0,01
60_0,02	2,46	0,03	2,52	0,03	2,49	0,02
70_0,02	2,47	0,01	2,51	0,06	2,45	0,01
60_0,03	2,45	0,01	2,68	0,29	2,61	0,31
70_0,03	2,46	0,01	2,51	0,05	2,44	0,08