



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**ESTHER MELLINA CASTRO E SILVA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE CORTE NO  
DESGASTE DE UMA FERRAMENTA CERÂMICA DURANTE O  
TORNEAMENTO DE UM AÇO ENDURECIDO**

**OURO PRETO - MG**  
**2025**

**ESTHER MELLINA CASTRO E SILVA**  
**esther.castro@aluno.ufop.edu.br**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE CORTE NO  
DESGASTE DE UMA FERRAMENTA CERÂMICA DURANTE O  
TORNEAMENTO DE UM AÇO ENDURECIDO**

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

**Professor orientador:** DSc. Igor César Pereira

**OURO PRETO – MG**  
**2025**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C355a Castro e Silva, Esther Mellina.  
Análise da influência da profundidade de corte no desgaste de uma  
ferramenta cerâmica durante o torneamento de um aço endurecido.  
[manuscrito] / Esther Mellina Castro e Silva. - 2025.  
37 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Igor Cezar Pereira.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Desgaste mecânico. 2. Usinagem. 3. Metais - Corte - Aço. 4.  
Máquinas-ferramenta. I. Pereira, Igor Cezar. II. Universidade Federal de  
Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Esther Mellina Castro e Silva**

**Análise da influência da profundidade de corte no desgaste de uma ferramenta cerâmica, durante o torneamento de um aço endurecido**

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

Aprovada em 04 de fevereiro de 2025

### Membros da banca

DSc - Igor César Pereira - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto  
DSc - Diogo Antônio de Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto  
DSc - Edson Alves Figueira Junior - Universidade Federal de Ouro Preto

Igor César Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/02/2025



Documento assinado eletronicamente por **Igor Cezar Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/02/2025, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0860366** e o código CRC **C4B80B9D**.

Agradeço a Deus e a minha família por  
todo apoio nessa caminhada.  
E a todos os amigos que a UFOP me  
proporcionou!

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Luis e Carla, e à minha irmã, Ruth, por serem meu alicerce em todos os momentos, sempre acreditando nos meus sonhos e me apoiando incondicionalmente. Aos meus avós, Magela e Diudes, pelo amor e inspiração que sempre me deram.

Sou profundamente grata à República Chega Mais, que não apenas foi um lar, mas também me proporcionou aprendizados valiosos e amizades que levarei para toda a vida.

Aos professores da Engenharia Mecânica, especialmente ao professor Igor, agradeço por toda a orientação e dedicação ao longo da jornada acadêmica.

Por fim, um agradecimento especial à universidade pública, que me ofereceu um ensino de excelência, reafirmando a importância do acesso à educação de qualidade para a transformação da sociedade. A todos, minha eterna gratidão!

*“A vida é pra quem sabe viver,  
procure aprender a arte;  
Pra quando apanhar não se abater,  
ganhar e perder faz parte”.*

## RESUMO

Este trabalho analisa o impacto dos parâmetros de corte na durabilidade de ferramentas de usinagem em processos com peças de aço endurecido, abordando a influência da profundidade de corte. O estudo foi desenvolvido como um estudo de caso experimental, comparando duas condições de corte: Condição 1, com profundidade de 0,25 mm, e Condição 2, com profundidade reduzida para 0,15 mm. Os ensaios foram realizados em um torno, monitorando o desgaste da ferramenta com medições de cratera e flanco por meio de estereomicroscópio, até atingir o limite máximo de desgaste estipulado em 0,250 mm. Os resultados evidenciaram que a redução da profundidade de corte aumentou significativamente o comprimento usinado, alcançando valores entre 1023,1 mm e 1159,9 mm na Condição 2, em comparação a 840,5 mm e 1040,0 mm na Condição 1, o que comprova a maior vida útil da ferramenta sob menor profundidade de corte. Conclui-se que ajustes precisos nos parâmetros de corte, especialmente na profundidade, são determinantes para otimizar o desempenho e prolongar a vida útil das ferramentas, proporcionando maior eficiência ao processo de usinagem. Este estudo reforça a relevância da pesquisa em usinagem para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis e econômicas na indústria.

**Palavras-chave:** Desgaste. Usinagem. Parâmetros de corte. Aço endurecido. Ferramentas.

## ABSTRACT

*This work analyzes the impact of cutting parameters on the durability of machining tools in processes with hardened steel parts, looking at the influence of variables such as depth of cut. The study was developed as an experimental case study, comparing two cutting conditions: Condition 1, with a depth of 0.25 mm, and Condition 2, with a depth reduced to 0.15 mm. The tests were carried out on a lathe, monitoring tool wear with crater and flank measurements using a stereomicroscope, until the maximum wear limit of 0.250 mm was reached. The results showed that reducing the depth of cut significantly increased the machined length, reaching values between 1023.1 mm and 1159.9 mm in Condition 2, compared to 840.5 mm and 1040.0 mm in Condition 1, which proves the longer tool life under lower depths of cut. It can be concluded that precise adjustments to cutting parameters, especially depth, are decisive in optimizing performance and extending tool life, providing greater efficiency to the machining process. This study reinforces the relevance of machining research for the development of more sustainable and economical practices in industry.*

*Key-words: Wear. Machining. Cutting parameters. Hardened steel. Tools.*

## LISTA DE SIMBOLOS

- $K_T$  – Profundidade da cratera
- $VB_{\text{máx}}$  – Desgaste de flanco máximo
- $VB_b$  – Desgaste de flanco médio
- $VB_n$  – Desgaste de entalhe
- $VB_c$  – Desgaste de ponta
- $R_a$  – Rugosidade média aritmética
- $V_c$  – Velocidade de corte (m/min)
- $a_p$  – Profundidade de corte (mm)
- $f$  – Avanço (mm/volta)
- $R^2$  – Coeficiente de determinação
- $y$  – Valores reais da variável dependente
- $\hat{y}$  – Valores previstos pela equação da curva de tendência
- $\bar{y}$  – Média dos valores reais de  $y$

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Áreas de desgaste em uma ferramenta de corte .....	11
Figura 2 – Parâmetros de desgaste das ferramentas de corte .....	12
Figura 3 – Desgaste de Flanco.....	13
Figura 4 – Desgaste de Cratera.....	13
Figura 5 – Representação alegórica dos domínios das duas modalidades de pesquisa. ....	17
Figura 6 – Insertos de cerâmica mista utilizados nos ensaios .....	18
Figura 7 – Ensaio com ferramenta de cerâmica mista e peça de aço endurecido.....	19
Figura 8 – Estereomicroscópio montado durante os ensaios.....	21
Figura 9 – Desgaste de flanco e cratera registrados durante os ensaios .....	21
Figura 10 – Resultados dos ensaios na Condição 1: profundidade de corte 0,25mm .....	24
Figura 11 – Desgastes finais de flanco (0,247mm) e de cratera do 1º Ensaio na Condição 1, à esquerda. Desgastes finais de flanco (0,254mm) e de cratera do 2º Ensaio na Condição 1, à direita. ....	25
Figura 12 – Resultados dos ensaios na Condição 2: profundidade de corte 0,15mm .....	26
Figura 13 – Desgastes finais de flanco (0,254mm) e de cratera do 1º Ensaio na Condição 2, à esquerda. Desgastes finais de flanco (0,262mm) e de cratera do 2º Ensaio na Condição 2, ao centro. Desgastes finais de flanco (0,247mm) e de cratera do 3º Ensaio na Condição 2, à direita. ....	27
Figura 14 – Linhas de tendência da evolução do desgaste de flanco da Condição 1 ( $v_c = 70\text{m/min}$ ; $f = 0,1\text{mm/v}$ ; $a_p = 0,25$ ) e da Condição 2 ( $v_c = 70\text{m/min}$ ; $f = 0,1\text{mm/v}$ ; $a_p = 0,15$ ).28	28
Figura 15 – Tempo de vida das ferramentas de acordo com as profundidades de corte utilizadas .....	29
Figura 16 – Resultados Experimentais para desgaste e rugosidade .....	31

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Composição química dos aços AISI e SAE.....	6
Tabela 2 – Composição Química do AISI D2 (em porcentagem %) .....	8
Tabela 3 – Propriedades das Principais Ferramentas Cerâmicas .....	9
Tabela 4 – Condições de Corte dos Ensaios.....	19
Tabela 5 – Condição 1 .....	23
Tabela 6 – Resultados da Condição 1.....	23
Tabela 7 – Condição 2 .....	25
Tabela 8 – Resultados da Condição 2.....	26

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral .....	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Aços Endurecidos .....	5
2.1.1	Classificação .....	5
2.1.2	Aço AISI D2.....	6
2.2	Ferramentas de Corte.....	8
2.2.1	Ferramentas Cerâmicas.....	8
2.3	Desgaste de Ferramentas de Corte.....	10
2.3.1	Tipos de Desgaste.....	11
2.3.2	Mecanismos de Desgaste.....	13
2.3.3	Desgaste de Ferramentas Cerâmicas .....	14
2.3.4	Desgaste de Ferramentas Cerâmicas Torneando Aços Endurecidos.....	15
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>17</b>
3.1	Tipo de Pesquisa.....	17
3.2	Materiais e Métodos .....	18
3.3	Equipamentos utilizados.....	20
3.4	Considerações Finais do Capítulo .....	22
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>23</b>
4.1	Análise dos resultados .....	27
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>32</b>
5.1	Conclusões.....	32
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>33</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>37</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

A maioria dos produtos industrializados passa por algum processo de usinagem em uma ou mais etapas de sua produção. A usinagem é amplamente utilizada na fabricação de peças em geral e está presente em diversos segmentos industriais. Por exemplo, ela é utilizada para fazer furos na indústria metal-mecânica, melhorar a qualidade superficial das peças, fabricar engrenagens para transmissão de potência, produzir componentes para a indústria aeroespacial, entre outros (MACHADO, 2015). As operações de usinagem podem ser aplicadas a uma variedade de materiais, incluindo polímeros, madeira, cerâmicos e compósitos, além dos materiais metálicos (SILVA, 2021).

Sendo amplamente utilizada em processos produtivos, a usinagem se torna um método importante, bem como o seu estudo, para a melhoria do desempenho das atividades industriais. Machado (2015) salienta que a ampla gama de opções para os parâmetros de entrada do processo resulta em inúmeras e complexas combinações, que podem ser analisadas através de experiência prática, experimentação específica e modelos teóricos, sendo recomendada a combinação dessas abordagens para alcançar soluções eficazes.

Independentemente da dureza e resistência mecânica dos materiais utilizados na usinagem, o desgaste progressivo da ferramenta de corte é inevitável. De acordo com Hamano (2017), estudar o desgaste da ferramenta é crucial na usinagem, pois, embora os custos com ferramentas sejam uma pequena fração dos processos de fabricação, o desgaste e os danos podem causar grandes perdas de produtividade devido ao tempo de parada para substituição e aumentar os custos de produção.

Uma ferramenta atinge o fim de sua vida quando o desgaste impede o cumprimento das tolerâncias dimensionais, geométricas e do acabamento exigidos para a peça, necessitando substituição, sendo que o desgaste de flanco ( $VB_{máx}$ ), é um dos critérios para essa determinação (MANARELLI, 2018). Tendo em vista que esse critério se relaciona diretamente com a vida da ferramenta, é necessário entender quais parâmetros influenciam o desgaste de flanco e de que maneira o influenciam. Segundo artigo publicado pela MITSUBISHI MATERIALS (2024), as condições ideais para usinagem são: o menor tempo de corte e a maior vida da ferramenta. Para obter estas condições é necessário a seleção eficiente de condições de corte e ferramentas; baseada no material usinado, dureza e formato da peça e capacidade da máquina. O artigo destaca que a velocidade de corte, o avanço e a profundidade são fatores

críticos que influenciam diretamente o desgaste da ferramenta. Ajustar esses parâmetros de forma adequada é essencial para otimizar a vida útil da ferramenta e a eficiência do processo de usinagem.

Estudar usinagem pode apresentar desafios significativos devido à complexidade dos processos envolvidos e à necessidade de compreender uma ampla gama de variáveis. A usinagem exige um conhecimento aprofundado sobre a interação entre a ferramenta e o material, bem como a influência de fatores como velocidade de corte, avanço e profundidade na qualidade do acabamento e na durabilidade da ferramenta (GOMES, 2021). Além disso, a diversidade de materiais e técnicas disponíveis requer uma análise detalhada para selecionar os parâmetros de usinagem apropriados, tornando o estudo um processo intensivo e técnico. Dessa forma, é possível destacar como pergunta problema do presente trabalho o seguinte questionamento:

### **Qual a influência da profundidade de corte no desgaste de uma ferramenta cerâmica durante o torneamento de um aço endurecido?**

#### **1.2 Justificativa**

O torneamento é um processo fundamental para a produção de componentes em diversos setores, como automotivo, aeroespacial e de maquinaria, contribuindo para a eficiência e desempenho de uma ampla gama de produtos industriais. Destaca-se especialmente a utilização de ferramentas cerâmicas no processo, uma vez que, no passado, sua fragilidade limitava sua aplicação (DUARTE, 2023). Com o surgimento de cerâmicas mistas, cerâmicas reforçadas com SiC (whiskers) e cerâmicas à base de nitreto de silício, essas ferramentas agora podem ser usadas em cortes interrompidos, como no fresamento de ferros fundidos cinzentos, a altíssimas velocidades de corte e com grandes avanços (SILVA, 2021).

De acordo com a empresa produtora de ferramentas de corte WFER – SUMITOMO (2024), a eficácia dos insertos cerâmicos está intimamente ligada ao seu uso adequado, conforme o tipo de corte a ser realizado. Estes insertos são essenciais para obter um acabamento superficial de alta qualidade nas indústrias. Também é crucial considerar a durabilidade da peça a ser usinada. Ressaltam, ainda, que devido à sua ampla utilização, é fundamental que as ferramentas cerâmicas sejam empregadas de acordo com as recomendações específicas e as orientações do fabricante para evitar falhas prematuras.

A avaliação de fatores como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte desempenha um papel crucial na determinação das condições que minimizem o desgaste de ferramentas cerâmicas. O manuseio correto dessas ferramentas, combinado com o ajuste ideal dos parâmetros de usinagem, favorece a eficiência do processo, aumentando a produtividade e diminuindo os custos operacionais. Dessa forma, investigar esses aspectos é vital para melhorar as práticas de torneamento e impulsionar aplicações industriais que exijam elevada precisão e resistência. Nesse contexto, a análise dos parâmetros de corte é indispensável para compreender a evolução do desgaste na ferramenta utilizada.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Geral**

Analisar a influência da profundidade de corte no desgaste de uma ferramenta cerâmica durante o torneamento de um aço endurecido.

#### **1.3.2 Específicos**

- Realizar a revisão bibliográfica sobre: aços endurecidos, ferramentas de corte (cerâmicas), desgaste de ferramentas de corte, mecanismos de desgaste e desgaste de ferramentas cerâmicas torneando aços endurecidos;
- Realizar os ensaios de torneamento em laboratório e coletar dados sobre a magnitude dos desgastes em função da variação da profundidade de corte
- Comparar os resultados obtidos em cada um dos ensaios
- Determinar a influência da profundidade de corte no desgaste da ferramenta

### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho será dividido em cinco capítulos, descritos a seguir. O primeiro capítulo tratará da formulação do problema, da justificativa para sua investigação, bem como do objetivo geral e dos objetivos específicos. O segundo capítulo apresentará a revisão bibliográfica, abrangendo os conceitos que fundamentam este estudo: aços endurecidos, ferramentas de corte, ferramentas cerâmicas, desgaste de ferramentas de corte, mecanismos de desgaste, e desgaste de ferramentas cerâmicas no torneamento de aços endurecidos, com ênfase no aço AISI D2. O terceiro capítulo detalhará a metodologia empregada para avaliar o desgaste das ferramentas

com base nos parâmetros adotados nos testes. No quarto capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados. Por fim, o quinto capítulo trará as conclusões e recomendações decorrentes do estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços Endurecidos

Os aços endurecidos são de grande importância na indústria devido à sua alta durabilidade e resistência, essenciais para a fabricação de componentes e ferramentas de alto desempenho. Segundo Pinedo (2021), os aços endurecidos, que possuem médio e elevado teor de carbono combinados com diversos elementos de liga, proporcionam flexibilidade nos processos de tratamento térmico, permitindo a obtenção de elevada dureza através de têmpera e revenimento.

Esses aços requerem bastante cuidado e atenção em todo o processo de fabricação, desde a fundição, passando pela transformação mecânica, até o tratamento térmico final e acabamento. Conforme Chiaverini (1996), a maioria das ferramentas e matrizes, como aquelas usadas para corte e estampagem profunda, é geralmente utilizada com a maior dureza possível, sendo necessário o endurecimento do aço para atingir os resultados desejados. A depender da aplicação que se destina o produto, torna-se possível manipular as variáveis do processo de tratamento térmico e alcançar características específicas.

#### 2.1.1 Classificação

Os aços e ligas podem ser classificados de diferentes formas de acordo com suas propriedades. É evidente que todas as categorias ou agrupamentos podem ser úteis em certas circunstâncias, cada uma dentro de sua finalidade. Uma das formas mais amplamente reconhecidas, que até mesmo influenciou o sistema utilizado no Brasil, é aquela que analisa a composição química dos aços, sendo particularmente populares os sistemas desenvolvidos pelo "American Iron and Steel Institute - AISI" e pela "Society of Automotive Engineers - SAE" (CHIAVERINI, 1996).

Os sistemas de classificação do AISI e da SAE, utilizam em geral quatro algarismos na forma ABXX ou cinco na forma ABXXX, onde A e B são números que identificam os principais elementos de liga presentes no aço e seus teores, dados em porcentagem em peso, e já os últimos algarismos XX ou XXX indicam a porcentagem em peso de carbono na composição química do aço, multiplicado por 100 (GERDAU AÇOMINAS, 2024). A Tabela 1 mostra as designações atribuídas aos diferentes tipos de aços e a respectiva descrição em termos de composição química.

Tabela 1 – Composição química dos aços AISI e SAE

Designação		Tipos de Aço
SAE	AISI/ABNT	
10XX	10XX	Aços carbono comuns, com máximo 1% Mn
11XX	11XX	Aços resulfurados de corte fácil, alta % S
13XX	13XX	Aços manganês com 1,75% Mn
23XX	23XX	Aços níquel com 3,5% Ni
25XX	25XX	Aços níquel com 5,0% Ni
31XX	31XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	33XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 3,5% de Ni e 1,55% de Cr
40XX	40XX	Aços molibdênio com 0,25% Mo
41XX	41XX	Aços cromo-molibdênio com 0,50 a 0,95% Cr e 0,12 a 0,30% Mo
43XX	43XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,80% Ni, 0,50 a 0,80% Cr e 0,25% Mo
46XX	46XX	Aços níquel-molibdênio com 1,80% Ni, 0,50 a 0,80% Cr e 0,25% Mo
47XX	47XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,05% Ni, 0,45 % Cr e 0,20 a 0,35% Mo
48XX	48XX	Aços níquel-molibdênio com 3,5% Ni e 0,25% Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,27 a 0,65% Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo-boro com 0,5% Cr e de 5 a 30 ppm B (◊)
51XX	51XX	Aços cromo com 0,8 a 1,05% Cr
51XXX	51XXX	Aços cromo com 1,0 % Cr e 1,0% min C
52XXX	52XXX	Aços cromo com 1,45 % Cr e 1,0% min C
61XX	61XX	Aços cromo-vanádio 0,60-0,95% Cr e 0,10 a 0,15% V
86XX	86XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,55% Ni, 0,5% Cr e 0,20% Mo*
87XX	87XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,55% Ni, 0,5% Cr e 0,25% Mo
92XX	92XX	Aços silício-manganês com 1,4 a 2,0% Si, 0,85 a 0,85% Mn e 0,65% Cr
93XX	93XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 3,25% Ni, 1,20% Cr e 0,12% Mo
94BXX	94BXX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,45% Ni, 0,40% Cr, 0,12% Mo e 30 ppm B (*) (◊)
98XX	98XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,0 % Ni, 0,80% Cr e 0,25% Mo

Fonte: GERDAU AÇOMINAS (2024)

Existem outros tipos de classificação específicas dos aços dentro das normas AISI e SAE, além das mencionadas acima. Essas classificações adicionais abrangem uma variedade de composições e propriedades mais específicas dos materiais. Além disso, existem outros sistemas de classificação de aços que não serão abordados neste trabalho, como as normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*), DIN (*Deutsches Institut für Normung*), e JIS (*Japanese Industrial Standards*), cada um com suas próprias metodologias e critérios para categorizar os diferentes tipos de aço.

### 2.1.2 Aço AISI D2

Dentro da classificação AISI, existem várias subclassificações que detalham ainda mais as propriedades específicas dos aços, permitindo uma identificação mais precisa das

características e aplicações ideais de cada tipo de material. Segundo Brunatto (2016) esta norma classifica os aços em dois grandes grupos de forma distinta, cada um com os seus respectivos subgrupos:

- Aços-ao-carbono e os aços de baixa-liga;
- Aços de alta-liga:
  - Aços resistentes a corrosão e a altas temperaturas;
  - Aços ferramenta.

De acordo com Souza (1989, p. 114), o aço-ferramenta é o material empregado na usinagem de metais ou não-metais duros, utilizando técnicas como corte, cisalhamento e desbaste. Ele conclui que suas principais propriedades incluem alta dureza, resistência ao desgaste, resistência a impactos ou choques, resistência a choques térmicos, estabilidade dimensional e resistência à perda de dureza durante o trabalho a quente.

Os aços ferramenta são classificados por meio de uma letra que indica, de alguma forma, as características do material, seguida de um ou dois números. Conforme Brunatto (2016), as principais categorias de aços, identificadas por essas letras na norma AISI, incluem:

- W: aços temperáveis em água;
- O: aços temperáveis em óleo;
- A: aços temperáveis ao ar;
- S: aços resistentes ao impacto;
- T: aço rápido ao tungstênio;
- M: aço rápido ao molibdênio;
- H: aço indeformável para trabalho a quente;
- D: aço indeformável para trabalho a frio;
- L: aço para uso especial em baixa-liga;
- F: aço para uso especial contendo carbono e tungstênio.

. Pode ser endurecido tanto ao ar quanto em óleo, exibindo alta tenacidade, excelente temperabilidade, grande resistência mecânica e notável resistência ao desgaste. A presença significativa de molibdênio (Mo) confere a este aço uma resistência superior ao amolecimento pelo calor. Sua composição química assegura um ótimo equilíbrio entre durabilidade e tenacidade. Este metal é ideal para a fabricação de matrizes de estampagem de grande porte, matrizes para extrusão a frio, ferramentas de perfuração, cunhagem, corte e puncionamento; rolos laminadores de rosca, calibradores, pontas de centros para tornos, moldes para cerâmica,

entre outras aplicações (AÇOS FAVORIT, 2024). A Tabela 2 mostra a composição química detalhada do AISI D2, material da peça utilizada nos ensaios do presente trabalho.

Tabela 2 – Composição Química do AISI D2 (em porcentagem %)

AISI D2								
C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni
1,4 – 1,6	0,3 – 0,5	0,3 – 0,5	11 - 13	0,8 máx.	-	0,7 – 1,2	0,6 máx.	-

Fonte: Adaptado de Souza (1989)

## 2.2 Ferramentas de Corte

As ferramentas de corte são elementos essenciais na usinagem, desempenhando um papel crucial na remoção de material para dar forma e acabamento a peças de trabalho. As propriedades e a qualidade do material usado na fabricação de uma ferramenta são cruciais para seu desempenho, pois diferentes tipos de aço podem ser escolhidos para aplicações específicas, devendo-se avaliar a durabilidade em cada contexto considerando produtividade, facilidade de fabricação da matriz e custo, sendo o critério final para a seleção da ferramenta o custo por peça produzida. (SILVA, 2021).

Outro fator importante para o desempenho das ferramentas de corte, além do material em si, é a geometria da peça. Segundo Machado *et al* (2015), independentemente da qualidade do material da ferramenta, o sucesso da operação depende de uma geometria adequadamente preparada, cuja importância é tão grande que torna essencial a padronização dos ângulos da cunha cortante para uniformizar a nomenclatura entre os profissionais e a literatura especializada.

### 2.2.1 Ferramentas Cerâmicas

As cerâmicas são frequentemente reconhecidas mais por suas propriedades do que por uma definição formal. De acordo com Machado *et al* (2015), as cerâmicas são formadas por elementos metálicos e não-metálicos, geralmente na forma de óxidos, carbonetos ou nitretos. A maioria possui uma estrutura cristalina, mas, ao contrário dos metais, as ligações entre os elementos são predominantemente iônicas ou covalentes.

Conforme os mesmos autores, as cerâmicas, com suas propriedades distintivas, podem ser identificadas através de uma série de características que incluem: sua capacidade como material refratário, capaz de resistir a altas temperaturas sem perder sua resistência mecânica; bem como sua alta resistência ao desgaste durante operações de usinagem; seus elevados valores de dureza; sua boa estabilidade química e térmica; sua resistência à fluência; e sua

notável resistência à compressão com baixa resistência à tração, apesar de também apresentar natureza frágil e baixa condutividade térmica

De modo geral, os materiais cerâmicos são classificados em dois grandes grupos, baseados no material da matriz: alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), cada um com suas subdivisões, onde os materiais desses subgrupos variam em composição química, processos de fabricação e propriedades (MATSUMOTO, 1998).

Este mesmo autor cita as seguintes subdivisões para os dois tipos de materiais cerâmicos, com as respectivas composições químicas:

- A BASE DE ALUMINA ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
  - Cerâmica Mista ou “Preta”:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$  ou  $\text{TiC}$
  - Cerâmica Pura, “Óxida” ou “Branca”:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$
  - Reforçada com Whiskers:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$
- A BASE DE NITRETO DE SILÍCIO ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )
  - Sialon: solução sólida de  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al} + \text{O}$

Cada tipo de cerâmica possui propriedades distintas, como dureza, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade térmica, que variam conforme sua composição e estrutura. Na usinagem, é importante considerar essas propriedades específicas para cada aplicação, garantindo a seleção adequada do material cerâmico que melhor atenda às exigências do processo e maximize a eficiência e a qualidade do produto final. A Tabela 3 mostra algumas propriedades dos principais tipos de ferramentas cerâmicas.

Tabela 3 – Propriedades das Principais Ferramentas Cerâmicas

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza (Gpa)	Tenacidade $K_{1C}$ (Mpa m <sup>1/2</sup> )	Coef. dilatação térmica ( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	Condutividade térmica ( $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
$\text{Al}_2\text{O}_3$	400	17,2	4,3	8,0	10,5
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	420	20,6	4,5	8,5	13,0
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	390	16,5	6,5	8,5	8,0
$\text{Si}_3\text{N}_4$ / SIALON	300	15,6	6,5	3,1	9,7
$\text{SiC}$ / WHISKER	390	18,5	8,0	6,4	32,0

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

Callister Jr. e Rethwisch (2020) consideram que a propriedade mecânica mais valorizada das cerâmicas é sua dureza, uma vez que os materiais mais rígidos conhecidos pertencem a esse grupo, sendo frequentemente empregados em situações que demandam ação abrasiva ou de polimento. Contudo, eles enfatizam que a obtenção de medidas precisas de dureza é desafiadora devido à fragilidade dos materiais cerâmicos e à alta probabilidade de trincas durante a aplicação de penetradores em suas superfícies, o que pode resultar em leituras imprecisas devido à formação de múltiplas fissuras.

Dos insertos cerâmicos mencionados anteriormente, aqueles que demonstram maior resistência à abrasão à temperatura ambiente incluem os insertos cerâmicos feitos de alumina reforçada com whiskers (2000 HV) e a cerâmica mista (2200 HV). No entanto, a avaliação da eficácia não deve se basear unicamente na dureza à temperatura ambiente dos insertos cerâmicos, pois a resistência ao calor do material da ferramenta e da peça pode variar conforme a interação entre a ferramenta e a peça (BALDONI E BULJAN, 1988 *apud* MATSUMOTO, 1998).

Atualmente, as ferramentas de cerâmica têm uma ampla aplicação em diversos processos de usinagem. Segundo publicação da SANDVIK COROMANT (2024), as diversas categorias de cerâmica encontram aplicação em uma vasta gama de contextos e materiais, predominantemente em operações de torneamento de alta velocidade, além de serem empregadas em processos de usinagem de canais e fresamento.

### **2.3 Desgaste de Ferramentas de Corte**

O desgaste em ferramentas de corte é inevitável e pode acontecer de diferentes formas e por diferentes mecanismos, sendo um fator crítico que afeta diretamente a eficiência e a qualidade do processo de usinagem. Independentemente da elevada dureza e resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e mesmo que a peça de trabalho possua baixa resistência mecânica, a ferramenta de corte inevitavelmente passará por um processo de desgaste que, em algum momento, demandará sua substituição (MACHADO *et al*, 2015).

Conforme mencionado por Stemmer (1993), à medida que a ferramenta se desgasta, ocorrem variações significativas no processo de usinagem, sendo que a temperatura aumenta gradualmente, a força de corte e o consumo de potência se elevam, as dimensões da superfície usinada mudam, e a qualidade do acabamento superficial se deteriora. Em condições extremas, há um intenso faiscamento durante o corte e a superfície usinada torna-se áspera.

### 2.3.1 Tipos de Desgaste

Existem diferentes tipos de desgaste que podem afetar as ferramentas de corte utilizadas na usinagem, cada um influenciando de maneira distinta o desempenho e a vida útil da ferramenta. A Figura 1 mostra as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte, sendo que três formas de desgaste podem ser identificadas nela: 1) Área A - desgaste de cratera; 2) Área B - desgaste de flanco; e 3) Áreas C e D - desgaste de entalhe (MACHADO *et al*, 2015).

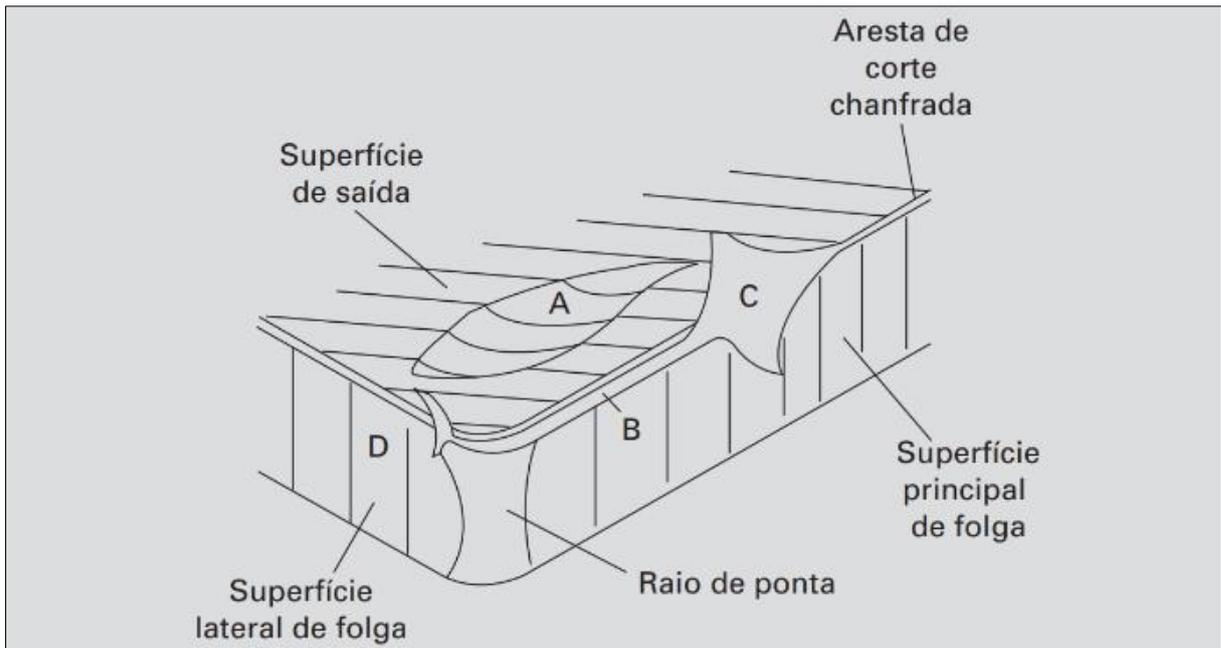


Figura 1 – Áreas de desgaste em uma ferramenta de corte  
Fonte: Dearnley e Trent (1982, *apud* MACHADO *et al*, 2015)

Conforme a Norma ISO 3685 (1977), é possível quantificar os desgastes através de alguns parâmetros, para garantir que a ferramenta seja reafiada ou substituída antes que qualquer forma de desgaste atinja proporções significativas e comprometa a segurança e a eficiência do processo de usinagem. Para ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmica, em operações de desbaste, a norma recomenda os seguintes critérios para fim de vida, ou seja, para realizar a afiação ou substituição da ferramenta quando esses valores forem atingidos:

- $KT$  = profundidade da cratera:  $0,06 + 0,3f_c$ , onde  $f_c$  é o avanço de corte (mm/rev);
- $VB_b$  = desgaste de flanco médio: 0,3 mm;
- $VB_{Bmáx}$  = desgaste de flanco máximo: 0,6 mm;
- $VB_N$  = desgaste de entalhe: 1 mm;
- $VB_C$  = desgaste de ponta.

Em operações de acabamento, a norma recomenda critérios baseados em parâmetros de rugosidade superficiais, como o  $R_a$ . A Figura 2 mostra, esquematicamente, como e onde cada um desses parâmetros podem ser medidos nas superfícies das ferramentas de corte.

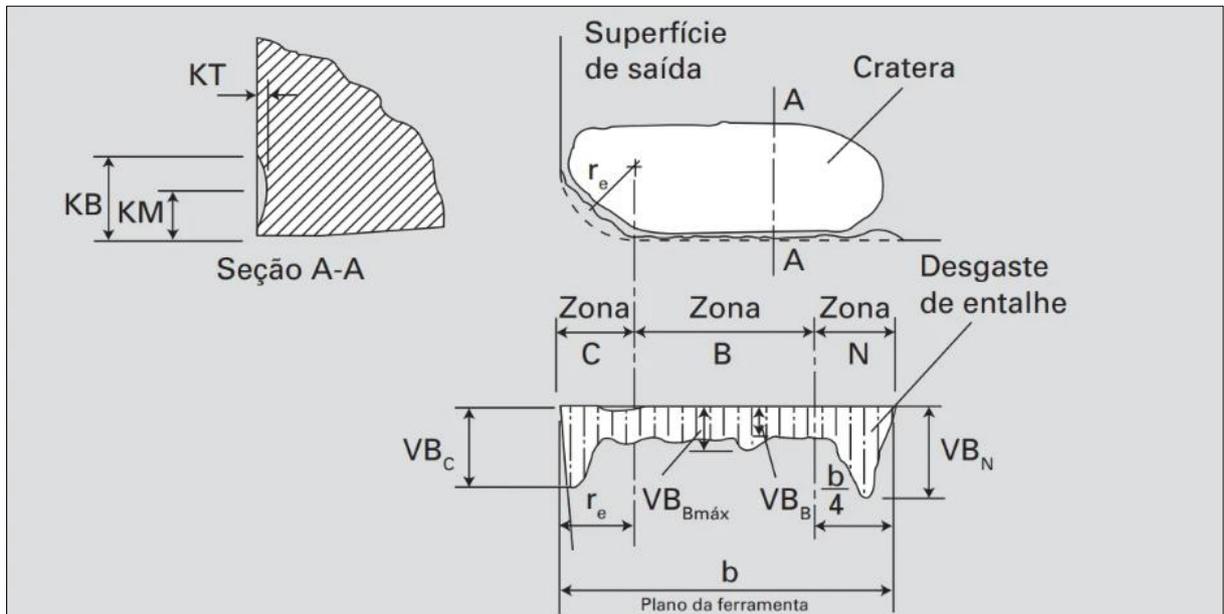


Figura 2 – Parâmetros de desgaste das ferramentas de corte  
Fonte: Machado *et al* (2015)

A Figura 3 ilustra uma ferramenta que apresenta desgaste de flanco, enquanto a Figura 4 representa uma ferramenta com desgaste de cratera. Ambos os tipos de desgaste serão analisados nos ensaios conduzidos no presente trabalho através de imagens realizadas em laboratório. Como mencionado anteriormente, cada um desses tipos de desgaste possui parâmetros específicos para serem medidos, como o desgaste de flanco, que é representado pelo parâmetro  $VB$ , e o desgaste de cratera, medido pelo parâmetro  $KT$ . Além disso, cada tipo de desgaste tem valores máximos estabelecidos de acordo com a norma regulamentadora, os quais devem ser rigorosamente observados para garantir a conformidade e a precisão nos ensaios e análises realizadas.



Figura 3 – Desgaste de Flanco  
Fonte: SANDVIK COROMANT S/A, 2024



Figura 4 – Desgaste de Cratera  
Fonte: SANDVIK COROMANT S/A, 2024

### 2.3.2 Mecanismos de Desgaste

Na literatura especializada, é possível encontrar diferentes classificações para os mecanismos de desgaste, mas a maioria delas considera os mesmos tipos fundamentais de desgaste ou utiliza uma nomenclatura distinta para descrever fenômenos essencialmente semelhantes.

Para aumentar a vida das ferramentas, é essencial entender as causas do desgaste. Os principais mecanismos de desgaste incluem (STEMMER, 1993):

- A deformação plástica;
- A abrasão;

- A aderência entre o material da peça e as irregularidades na superfície da ferramenta;
- A difusão de elementos entre o material da peça e da ferramenta, mudanças na estrutura, dissolução de carbonetos no cobalto;
- A oxidação do material superficial da ferramenta;
- As correntes elétricas iônicas geradas pelo atrito entre a peça e a ferramenta.

Cada tipo de desgaste está relacionado a um ou mais mecanismos específicos de desgaste, o que significa que diferentes causas podem resultar nos mesmos padrões de desgaste. Além disso, em um mesmo processo de usinagem, é possível que a ferramenta experimente diversos tipos de desgaste simultaneamente, decorrentes de uma combinação de fatores que acionam diferentes mecanismos dentro do mesmo sistema.

Portanto, compreender e identificar os múltiplos mecanismos de desgaste envolvidos é crucial para otimizar a vida útil das ferramentas e melhorar a eficiência do processo de usinagem.

### **2.3.3 Desgaste de Ferramentas Cerâmicas**

O desgaste em ferramentas de corte de cerâmica é um fenômeno complexo que pode ser influenciado por diversos fatores. Conforme publicação de Silva, Coelho e Catai (2004), os mecanismos de desgaste das ferramentas cerâmicas são complexos e geralmente afetados por fatores como difusão, lascamento, abrasão na superfície do flanco, adesão na superfície de saída, amolecimento térmico, fratura catastrófica, formação de crateras e desgaste de entalhe tanto no flanco quanto na aresta secundária. Eles ressaltam que ferramentas cerâmicas são especialmente adequadas para operações a altas velocidades de corte, pois nessas condições, o desgaste do flanco compete com o desgaste de entalhe, variando conforme o tipo específico de cerâmica empregado.

Já no caso da usinagem das superligas de níquel com ferramenta de cerâmica, Lima (2012) destaca como mecanismos e tipos de desgaste presentes: a difusão, abrasão na superfície de folga, adesão na superfície de saída, desgaste de cratera e desgaste de entalhe na aresta principal e na aresta lateral.

As características das cerâmicas já discutidas no tópico 2.2.1 deste trabalho, como sua capacidade como material refratário, sua alta resistência ao desgaste e seus elevados valores de dureza, são determinantes para identificar os tipos de mecanismos que ocorrerão e os desgastes que esses mecanismos provocarão. Além das propriedades da cerâmica utilizada, também é

importante considerar qual o tipo de material a ser usinado e quais as condições do processo, uma vez que a intensidade dos mecanismos também é influenciada pelas características do conjunto ferramenta-peça. No caso do torneamento com ferramenta de cerâmica, por exemplo, os desgastes observados durante o processo em alta velocidade de corte não resultam de um único mecanismo de desgaste, mas de uma combinação de vários mecanismos simultâneos (SILVA, COELHO, E CATAI; 2004).

#### **2.3.4 Desgaste de Ferramentas Cerâmicas Torneando Aços Endurecidos**

Matsumoto (1998) destaca alguns aspectos importantes da usinagem em seu estudo sobre o processo de torneamento de aços endurecidos. O autor realiza diferentes ensaios para comparar o desgaste em ferramentas cerâmicas e em ferramentas de PCBN (Nitreto Cúbico de Boro Policristalino). Ele chega à conclusão de que as ferramentas cerâmicas demonstraram desempenho superior em termos de vida útil em comparação com as ferramentas de PCBN. As formas de desgaste das ferramentas de PCBN aumentaram rapidamente a rugosidade das peças, ultrapassando rapidamente o valor limite de rugosidade ( $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ ) adotado como critério de fim de vida. Apesar de terem uma média de vida útil maior, as ferramentas cerâmicas mostraram uma maior dispersão, devido ao lascamento das arestas de corte. Estas arestas, por vezes, se acomodaram, mantendo ou até reduzindo a rugosidade, enquanto em outras situações, deterioraram-se rapidamente, atingindo o fim da vida útil.

Malère (2006) desenvolveu uma pesquisa focada na substituição das ferramentas inicialmente utilizadas de metal duro, por outras de cerâmica, no processo de torneamento de cilindros de laminação. Ele salienta que a propensão das ferramentas cerâmicas a fraturar de forma súbita é um fator que tem limitado sua aplicação industrial mais ampla. Os insertos de cerâmica devem ser monitorados em relação ao desgaste máximo de folga e de saída, além de possíveis lascamentos. Malère (2006) conclui que os aços com cavacos longos causam intenso desgaste e fratura em cerâmicas à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiAlON}$  e alumina, tornando seu uso desvantajoso. Além disso, cerâmicas são sensíveis a mudanças bruscas de carga, exigindo redução significativa na velocidade de corte ao mudar de torneamento paralelo para torneamento de raio, o que não é necessário para ferramentas de metal duro. Por fim, Malère (2006) enfatiza que enquanto o metal duro enfrenta extrema dificuldade para lidar com ligas de maior dureza e alto teor de elementos de liga, os insertos cerâmicos possibilitam a execução de passes contínuos em peças temperadas ou endurecidas.

Conclui-se que os estudos aqui referenciados servem como alicerce para a realização de experimentos que visam otimizar as condições de usinagem, maximizando a vida útil das

ferramentas e garantindo maior eficiência nos processos industriais. Assim, este capítulo fundamenta a relevância científica e prática do tema abordado.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia empregada para investigar a influência dos parâmetros de corte no desgaste de uma ferramenta cerâmica durante o torneamento de aço endurecido. Serão explorados os fundamentos e conceitos discutidos na revisão bibliográfica, com foco na análise dos resultados obtidos em relação ao desempenho da ferramenta.

Todos os ensaios e variações de parâmetros foram repetidos três vezes para garantir uma maior representatividade dos dados. Foram seguidos os mesmos padrões de montagem e execução em todos os testes, visando minimizar as variáveis externas que poderiam distorcer os resultados, comprometendo a comparação entre os parâmetros.

#### 3.1 Tipo de Pesquisa

As pesquisas podem adotar uma abordagem quantitativa ou qualitativa, dependendo dos objetivos e da natureza dos dados a serem analisados. Günther (2006) discute que, embora existam variações entre as áreas que utilizam diferentes métodos de pesquisa, cada um possui suas vantagens específicas. Ele enfatiza que a observação se destaca pelo realismo na situação analisada, enquanto o experimento permite a “randomização” das características dos participantes e facilita inferências causais. Já o levantamento de dados por amostragem, ou “*survey*”, proporciona melhor representatividade e possibilita a generalização dos resultados para uma população mais ampla.

A Figura 5 mostra a relação dos dois possíveis domínios das modalidades de pesquisa discutidas.

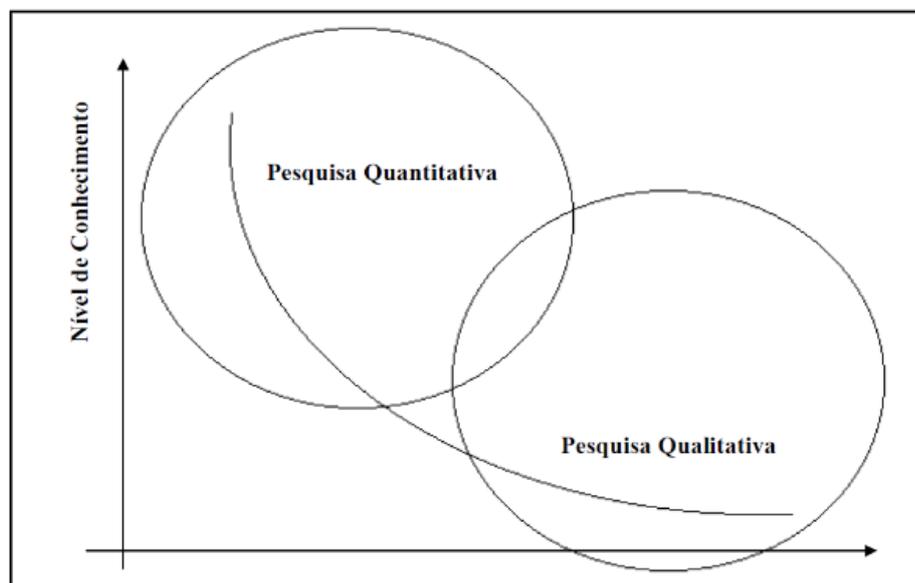


Figura 5 – Representação alegórica dos domínios das duas modalidades de pesquisa.  
Fonte: Silva e Simon (2005)

A presente pesquisa é de natureza quantitativa, conforme argumentado por Silva *et al.* (2014), que afirmam que, ao se conhecer as dimensões e características de um objeto de estudo, é possível realizar uma investigação quantitativa. No entanto, ele afirma que para essa abordagem seja eficaz, é essencial que o pesquisador possua um conhecimento aprofundado sobre o tema em questão, como mostra a Figura 6. Isso é necessário para a construção de um instrumento de medida, como uma escala de atitude, que deve ser capaz de contemplar todas as possíveis dimensões do objeto estudado, garantindo assim a completude do instrumento.

### 3.2 Materiais e Métodos

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados corpos de prova de aço endurecido, material empregado na indústria devido à sua elevada resistência ao desgaste e dureza. As ferramentas de corte escolhidas foram insertos de cerâmica mista à base de  $Al_2O_3$ , selecionados por suas propriedades de alta resistência ao desgaste e estabilidade térmica, como mostra a Figura 6.



Figura 6 – Insertos de cerâmica mista utilizados nos ensaios  
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Os ensaios foram realizados no torno Romi Centur 30D, localizado no Laboratório de Usinagem da UFOP. A Figura 7 ilustra a montagem do experimento.

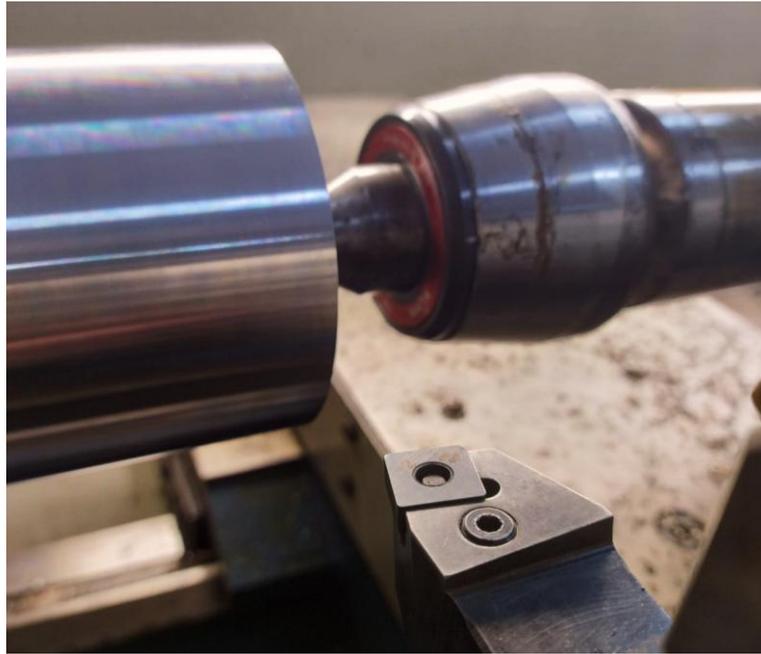


Figura 7 – Ensaio com ferramenta de cerâmica mista e peça de aço endurecido  
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Os ensaios foram conduzidos em duas condições de corte distintas, com variação apenas na profundidade de corte, enquanto a velocidade e o avanço foram mantidos constantes. No total, as passadas realizadas no torno durante os experimentos permitiram uma coleta substancial de dados para a análise de desgaste. Cada ciclo de corte foi cuidadosamente monitorado, com medições realizadas no decorrer dos ensaios para garantir que o desgaste fosse registrado ao longo do tempo.

A Tabela 4 apresenta as duas condições de corte utilizadas nos ensaios de desgaste de flanco. Essas condições foram definidas com base em combinações específicas de profundidade de corte, permitindo observar a influência desse parâmetro no comportamento da ferramenta de cerâmica mista.

Tabela 4 – Condições de Corte dos Ensaios

<b>VARIÁVEIS</b>	<b>CONDIÇÃO 1</b>	<b>CONDIÇÃO 2</b>
<b>Velocidade de Corte</b>	70 m/min	70 m/min
<b>Avanço</b>	0,1 mm/volta	0,1 mm/volta
<b>Profundidade</b>	0,25 mm	0,15 mm

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Os ensaios foram realizados para analisar o desgaste de flanco da ferramenta de cerâmica mista sob duas condições distintas de profundidade de corte. O número de experimentos foi determinado considerando as limitações de material disponível, os custos envolvidos e a logística para aquisição das ferramentas. Dessa forma, a Condição 1 foi testada com duas réplicas, enquanto a Condição 2 com três, totalizando cinco experimentos, garantindo uma análise comparativa viável dentro das restrições do estudo.

O processo foi monitorado e interrompido periodicamente, após algumas passadas no torno, para que a ferramenta fosse desmontada e o desgaste avaliado com o uso de um estereomicroscópio. É importante ressaltar que cada passada da ferramenta no torno equivale a um valor diferente de comprimento usinado, sendo que com o aumento do número de passadas o comprimento desgastado de cada passada foi cada vez menor. Isso por limitações da montagem dos ensaios, uma vez que o objetivo era não usinar até o fim da peça e sim manter um padrão de parar antes do comprimento final.

Com base na literatura revisada, foi adotado um limite de 0,250 mm de desgaste de flanco como critério de fim de vida útil da ferramenta. Dessa forma, o limite serviu tanto para proteger a integridade da ferramenta quanto para assegurar que os dados coletados fossem a respeito do desgaste e não de avarias.

Além do desgaste de flanco, também foi realizado o registro do desgaste de cratera, ainda que ele não seja o foco principal do experimento. Embora as medições quantitativas não tenham sido realizadas para o desgaste de cratera, seu monitoramento visual complementou a análise qualitativa do desgaste geral. Esse desgaste adicional reflete condições de esforço térmico e mecânico enfrentadas pela ferramenta, proporcionando uma visão mais ampla do comportamento do material nas condições de trabalho.

### **3.3 Equipamentos utilizados**

Para a realização desta pesquisa, foi utilizado um estereomicroscópio do laboratório da UFOP, que permitiu medições precisas do desgaste de flanco das ferramentas de corte. Com aumentos que variam de 10 a 40 vezes.

Neste trabalho utilizamos um aumento de 20x para os registros do desgaste de cratera e 15x para os do desgaste de flanco. A Figura 8 mostra o equipamento utilizado e sua montagem. Já a Figura 9 é um registro do desgaste de flanco e de cratera obtido utilizando esse equipamento.

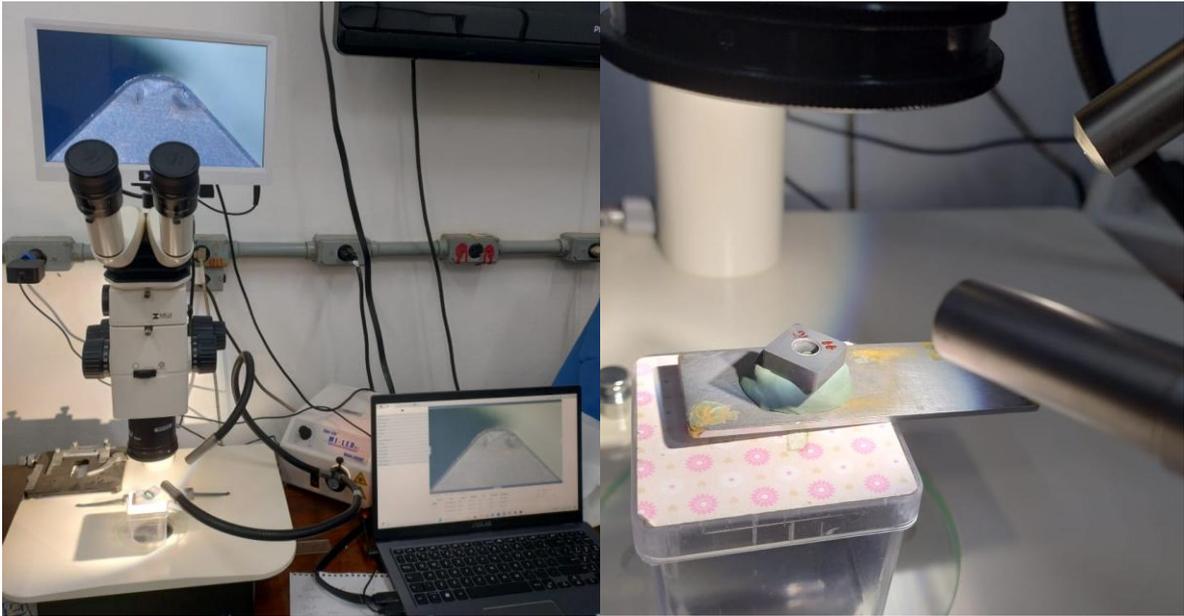


Figura 8 – Estereomicroscópio montado durante os ensaios  
Fonte: Pesquisa direta (2024)

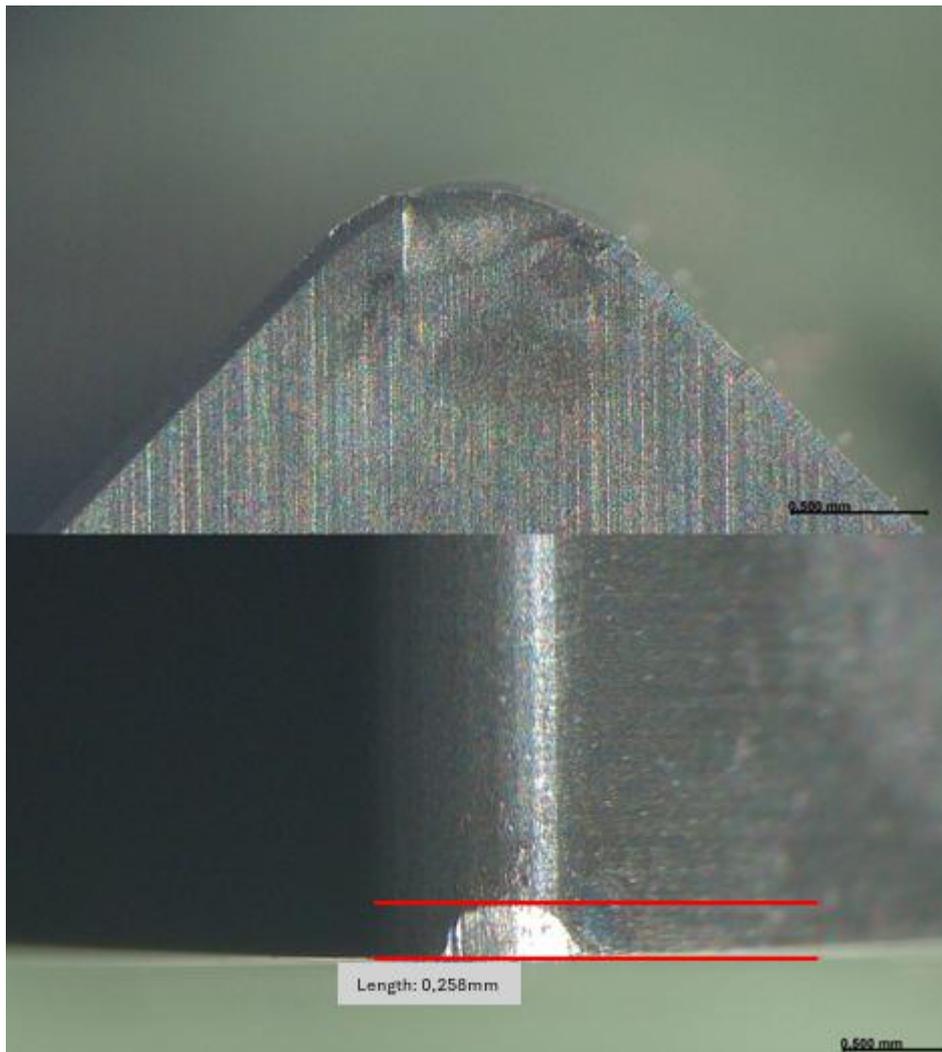


Figura 9 – Desgaste de flanco e cratera registrados durante os ensaios  
Fonte: Pesquisa direta (2024)

### **3.4 Considerações Finais do Capítulo**

Neste capítulo discutiram-se as metodologias aplicadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, proporcionando uma compreensão abrangente dos processos envolvidos. Foram apresentados em detalhes o tipo de pesquisa realizada, bem como os objetivos que orientaram a investigação, os procedimentos que foram adotados para alcançar os resultados desejados, as variáveis e indicadores considerados, além do instrumento de coleta de dados utilizado. Essa abordagem metódica é fundamental para garantir a rigorosidade e a validade das conclusões obtidas.

No próximo capítulo, será feita a apresentação dos resultados da pesquisa, acompanhada de uma análise aprofundada das discussões pertinentes e da relevância das contribuições oferecidas por este estudo para o campo em questão.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, são descritos os resultados das medições de desgaste de flanco na ferramenta de cerâmica mista, obtidos por meio dos ensaios realizados em laboratório. As medições seguiram um limite específico para desgaste máximo, definido com base na literatura e nas condições estabelecidas para o experimento, permitindo uma análise da variável observada. Os dados são organizados conforme as configurações de velocidade, avanço e profundidade aplicadas, possibilitando uma visão clara dos impactos de cada parâmetro no desempenho da ferramenta ao longo dos ensaios realizados.

Os ensaios foram realizados com duas réplicas na Condição 1, utilizando duas arestas distintas de ferramentas de cerâmica mista. Em cada ensaio, foram aplicados os mesmos parâmetros de velocidade de corte (70 m/min), avanço (0,1 mm/volta) e profundidade de corte (0,25 mm), conforme detalhado na Tabela 5. Essa configuração foi planejada para verificar o desempenho da ferramenta e avaliar o desgaste de flanco sob essas condições.

Tabela 5 – Condição 1

<b>Velocidade de Corte</b>	70 m/min
<b>Avanço</b>	0,1 mm/volta
<b>Profundidade</b>	0,25 mm

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Com base nesses valores, foram realizadas várias passadas no torno, interrompendo-se o processo após cada conjunto de passadas para medir o desgaste com auxílio do estereomicroscópio, mantendo o limite de 0,250 mm de desgaste de flanco como critério de fim de vida. A Tabela 6 abaixo apresenta os resultados obtidos, indicando o comprimento total usinado em cada um dos ensaios até atingir o limite estabelecido.

Tabela 6 – Resultados da Condição 1

<b>CONDIÇÃO 1</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>Comprimento Total Usinado (mm)</b>
<b>1º</b>	840,5
<b>2º</b>	1040,0

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Os comprimentos usinados variaram entre os ensaios, pois as amostras foram obtidas a partir de "passadas" realizadas no torno, cada uma correspondendo a valores distintos. Esse

método de coleta foi escolhido para garantir que o desgaste fosse monitorado de maneira contínua e em condições reais de operação.

A Figura 10 apresenta a evolução do desgaste da ferramenta em função do comprimento usinado na Condição 1. Além disso, o gráfico exibe a linha de tendência gerada a partir do Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), representando o comportamento da evolução do desgaste da ferramenta ao operar sob esta condição. O valor de  $R^2$  calculado foi 0,9277, através da fórmula abaixo:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2}$$

- $y$  são os valores reais da variável dependente (desgaste)
- $\hat{y}$  são os valores previstos pela equação da curva de tendência
- $\bar{y}$  é a média dos valores reais de  $y$

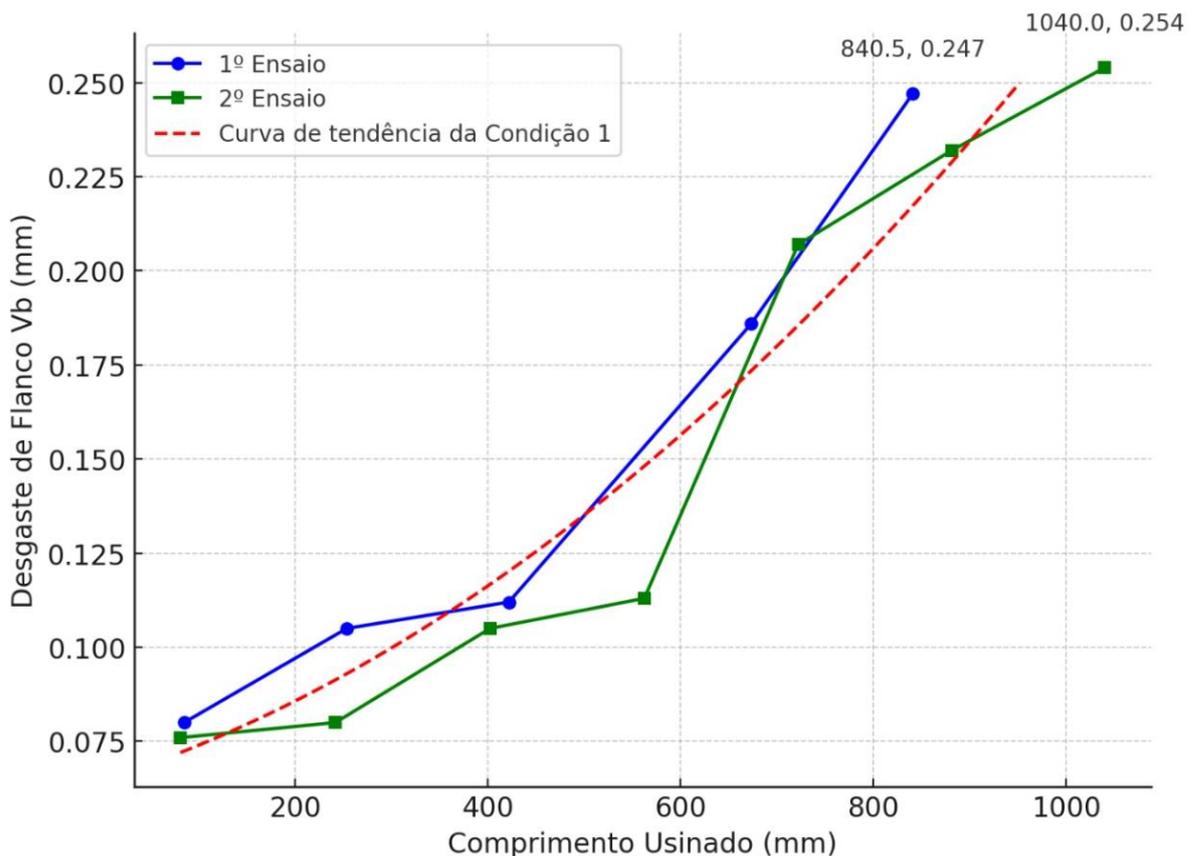


Figura 10 – Resultados dos ensaios na Condição 1: profundidade de corte 0,25mm  
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Essa abordagem fornece uma visão consolidada e detalhada do desempenho da ferramenta, permitindo analisar como a profundidade de corte de 0,25 mm afeta o desgaste ao

longo do processo de usinagem. A linha de tendência é uma representação média que facilita a comparação com outras condições de usinagem, ajudando a avaliar a eficiência da ferramenta e a prever sua vida útil em operações similares.

A Figura 11 mostra o registro do desgaste de flanco e do desgaste de cratera da ferramenta utilizada no 1º Ensaio, capturado por meio do estereomicroscópio. Neste momento o comprimento total usinado alcançou 840,5 mm e o desgaste atingiu 0,247 mm. Ela também mostra a imagem do 2º Ensaio, no instante em que o desgaste alcançou 0,254 mm e o comprimento total usinado atingiu 1040 mm.

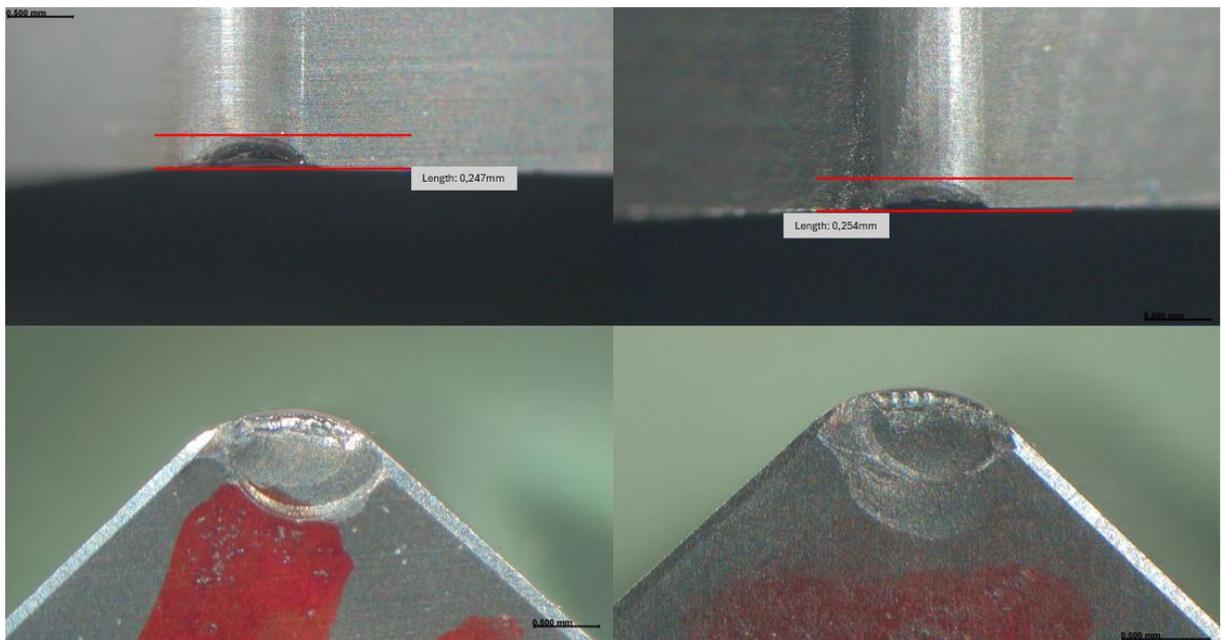


Figura 11 – Desgastes finais de flanco (0,247mm) e de cratera do 1º Ensaio na Condição 1, à esquerda. Desgastes finais de flanco (0,254mm) e de cratera do 2º Ensaio na Condição 1, à direita.

Fonte: Pesquisa direta (2024)

Na Condição 2 foram realizados três ensaios, cada um utilizando uma aresta de uma das ferramentas de cerâmica mista, empregando os seguintes parâmetros de corte: velocidade de 70 m/min, avanço de 0,1 mm/volta e profundidade de 0,15 mm, conforme especificado na Tabela 7. Essa configuração foi estabelecida para avaliar a interação entre um menor valor de profundidade e o desempenho da ferramenta em termos de desgaste.

Tabela 7 – Condição 2

<b>Velocidade de Corte</b>	70 m/min
<b>Avanço</b>	0,1 mm/volta
<b>Profundidade</b>	0,15 mm

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Nesta condição, foram realizadas diversas passadas no torno, sendo o limite máximo de desgaste de flanco, fixado em 0,250 mm, novamente adotado como critério de fim dos ensaios, garantindo consistência e confiabilidade entre as condições testadas. A Tabela 8 a seguir apresenta os resultados obtidos, destacando o comprimento total usinado em cada um dos três ensaios até alcançar o limite de desgaste estabelecido.

Tabela 8 – Resultados da Condição 2

CONDIÇÃO 2	
Ensaio	Comprimento Total Usinado (mm)
1º	1159,9
2º	1023,1
3º	1159,5

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Assim como na Condição 1, as medições de desgaste na Condição 2 foram realizadas em diferentes comprimentos usinados acumulados, obtidos por meio de "passadas" no torno, cada uma correspondendo a valores distintos de comprimento usinado. A Figura 12 mostra a evolução do desgaste e a linha de tendência, com valor de  $R^2$  de 0,9224, também calculado pela equação do Coeficiente de Determinação.

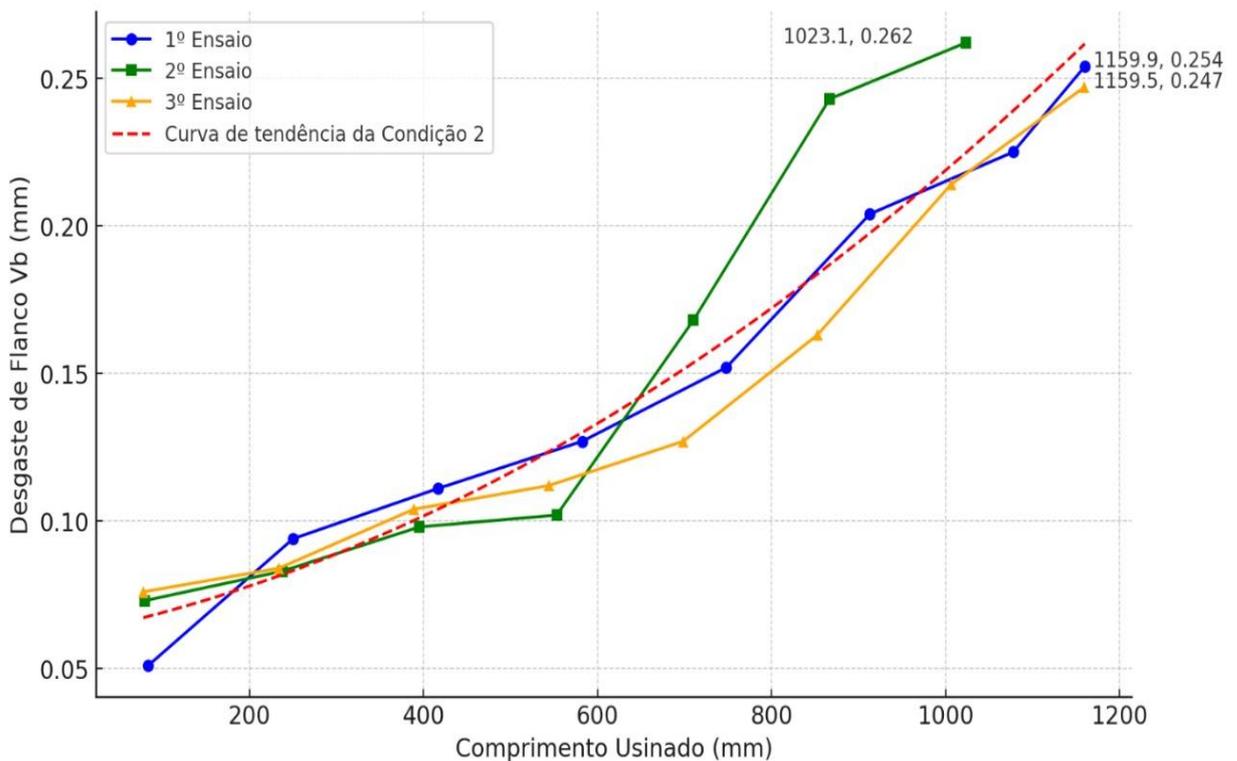


Figura 12 – Resultados dos ensaios na Condição 2: profundidade de corte 0,15mm

Fonte: Pesquisa direta (2024)

A Figura 13 mostra a ferramenta com desgaste de flanco e de cratera da ferramenta no 1º Ensaio, quando o comprimento total usinado atingiu 1159,9 mm e o desgaste chegou a 0,254 mm. Também são mostrados os resultados do 2º Ensaio, com desgaste de 0,262 mm e comprimento total usinado de 1023,1 mm. Por fim, a figura mostra o 3º Ensaio, registrando um desgaste de 0,247 mm após 1159,5 mm de comprimento usinado.

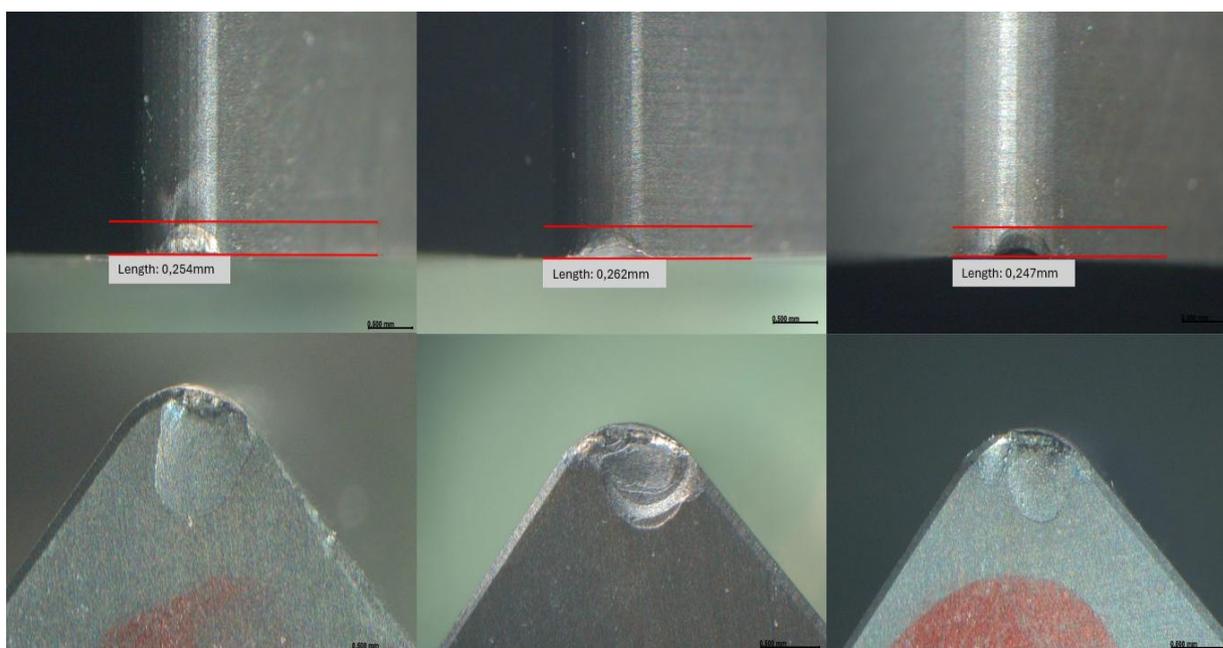


Figura 13 – Desgastes finais de flanco (0,254mm) e de cratera do 1º Ensaio na Condição 2, à esquerda. Desgastes finais de flanco (0,262mm) e de cratera do 2º Ensaio na Condição 2, ao centro. Desgastes finais de flanco (0,247mm) e de cratera do 3º Ensaio na Condição 2, à direita.

Fonte: Pesquisa direta (2024)

#### 4.1 Análise dos resultados

A Condição 1 resultou em um desgaste significativo da ferramenta, atingindo o limite de 0,250 mm de desgaste de flanco em 840,5 mm de comprimento usinado no 1º ensaio e 1040,0 mm no 2º ensaio. A maior profundidade de corte nesta condição contribuiu para o desgaste mais acentuado e rápido da ferramenta.

Na Condição 2, a profundidade de corte foi reduzida de 0,25 mm para 0,15 mm, mantendo-se os mesmos valores de velocidade de corte (70 m/min) e avanço (0,1 mm/volta). Essa modificação teve um impacto direto na redução do desgaste da ferramenta, permitindo usinar comprimentos maiores antes de atingir o limite de desgaste de flanco. Nos três ensaios realizados sob essa condição, os comprimentos usinados variaram de 1023,1 mm a 1159,9 mm antes de atingir ou ultrapassar o limite estabelecido, evidenciando o efeito positivo da menor profundidade de corte na durabilidade da ferramenta.

Dessa forma, os resultados indicam que a Condição 2 proporcionou maior resistência ao desgaste em relação à Condição 1, indicando que a profundidade de corte reduzida favorece a durabilidade da ferramenta ao minimizar o esforço e as tensões aplicadas durante o processo de usinagem.

A Figura 14 mostra a evolução do desgaste em função do comprimento usinado para as duas condições de corte testadas. A linha de tendência referente à Condição 1 revela um desgaste mais rápido da ferramenta, com o limite de 0,250 mm sendo alcançado após comprimentos usinados de 840,5 mm no 1º ensaio e 1040,0 mm no 2º ensaio. Por outro lado, a linha de tendência da Condição 2 demonstra melhor desempenho, com comprimentos usinados superiores (variando de 1023,1 mm a 1159,9 mm) antes de atingir o limite de desgaste, reforçando a influência positiva da menor profundidade de corte na durabilidade da ferramenta.

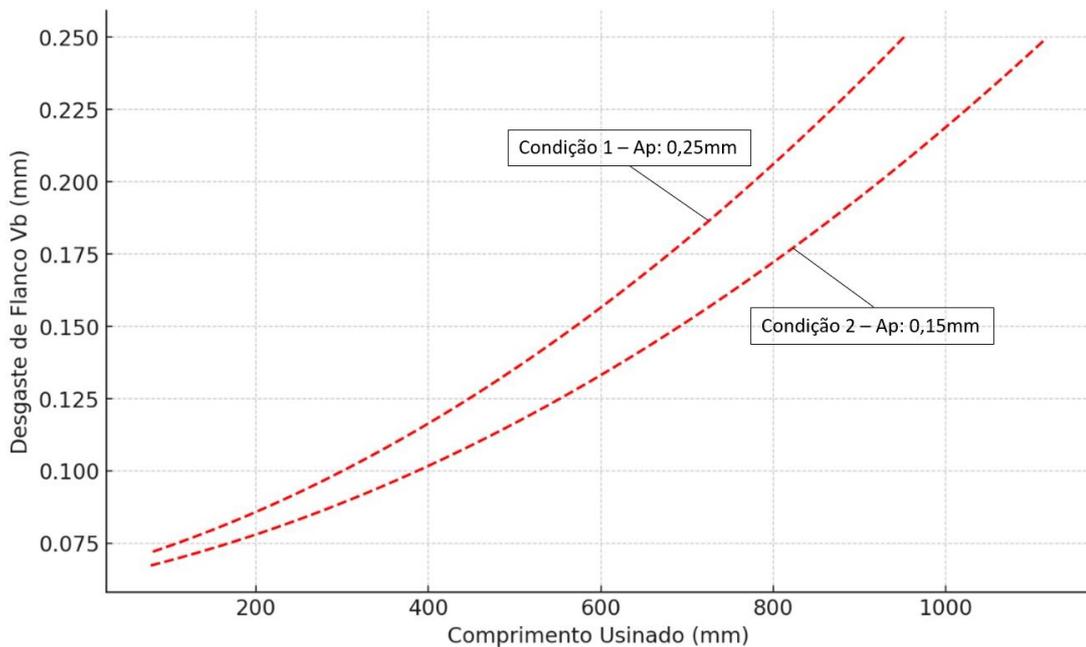


Figura 14 – Linhas de tendência da evolução do desgaste de flanco da Condição 1 ( $v_c = 70\text{m/min}$ ;  $f = 0,1\text{mm/v}$ ;  $a_p = 0,25$ ) e da Condição 2 ( $v_c = 70\text{m/min}$ ;  $f = 0,1\text{mm/v}$ ;  $a_p = 0,15$ )  
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Os resultados indicaram que, ao diminuir a profundidade de corte, o comprimento total usinado antes de alcançar o limite de desgaste de flanco aumentou. A Figura 15 ilustra a relação entre a profundidade de corte e o comprimento usinado, utilizando a média dos valores de comprimento usinado obtidos em cada condição. Essa relação demonstra diretamente qual profundidade de corte levou a um maior tempo de vida útil da ferramenta, evidenciando que a menor profundidade resultou em menor desgaste e maior eficiência durante a operação.

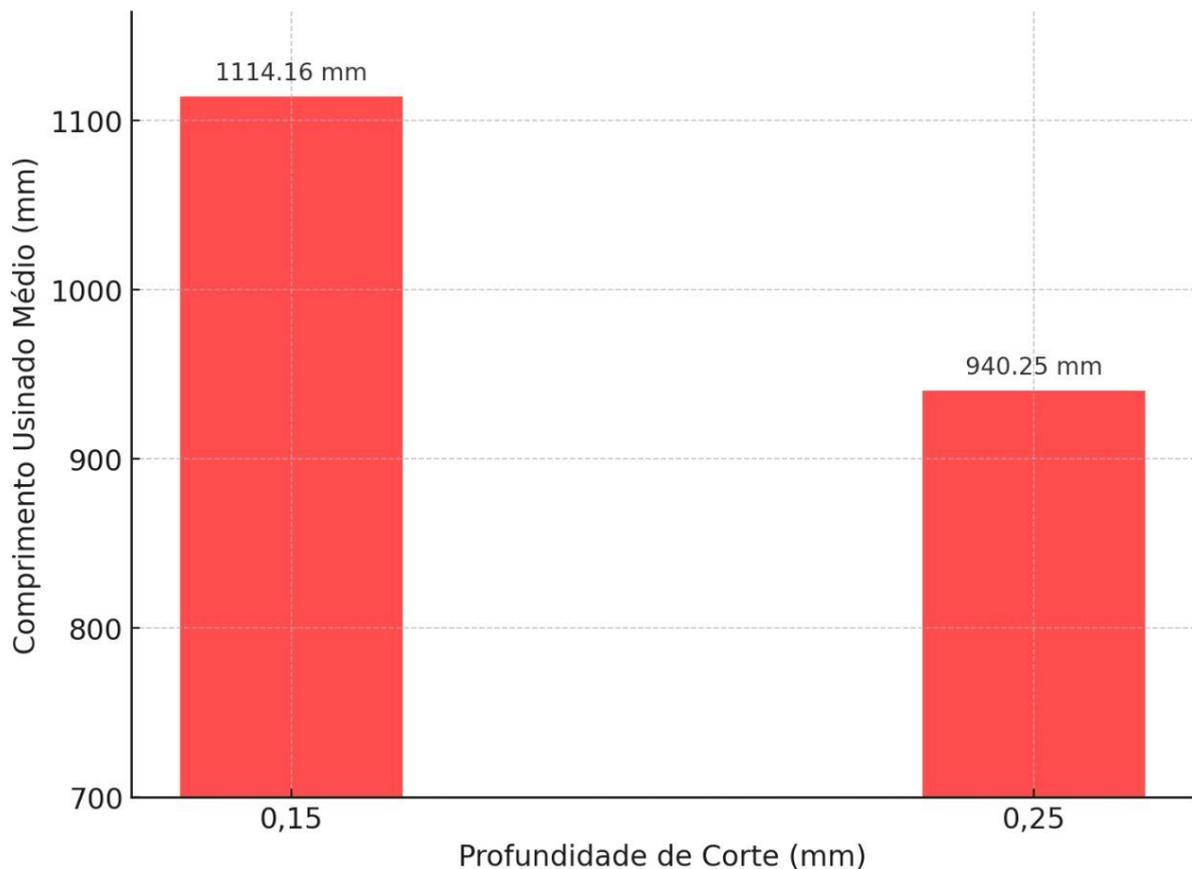


Figura 15 – Tempo de vida das ferramentas de acordo com as profundidades de corte utilizadas  
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Essa redução era esperada devido às características físicas do processo de usinagem. De acordo com a pesquisa de Sadílek et al. (2015), à medida que a profundidade de corte aumenta, as forças de corte mantêm uma tendência de crescimento linear. Isso ocorre porque um aumento na profundidade de corte resulta em um maior volume de material removido por passada, exigindo mais esforço da ferramenta e, conseqüentemente, gerando maiores forças mecânicas. Essas forças adicionais contribuem para um desgaste mais acelerado da ferramenta, especialmente na região do flanco, onde o contato e a pressão são mais intensos.

Além disso, os autores também apontam que a temperatura máxima gerada na interface entre a ferramenta e a peça usinada também cresce com o aumento da profundidade de corte. Temperaturas mais altas aceleram os mecanismos de desgaste, que comprometem a integridade da ferramenta ao longo do processo.

A comparação entre as Condições 1 e 2 evidencia que a redução da profundidade de corte desempenha um papel significativo na mitigação do desgaste da ferramenta, confirmando os achados da literatura. Ajustar esse parâmetro é uma estratégia eficaz para melhorar a

eficiência do processo de usinagem e preservar a vida útil das ferramentas, sem comprometer significativamente a qualidade do material usinado.

Embora o desgaste tenha sido maior na condição com maior profundidade de corte, as ferramentas cerâmicas, ainda sim, são amplamente reconhecidas como uma boa opção para a usinagem de materiais endurecidos devido à sua excelente resistência ao desgaste e à sua capacidade de manter desempenho estável mesmo sob condições de corte severas. No estudo realizado pelos pesquisadores indianos R. Surech e S. Basavarajappa (2014), intitulado Efeito dos Parâmetros de Corte no Desgaste e na Rugosidade durante o Torneamento de um Aço Endurecido AISI H13 com uma Ferramenta de Cerâmica, foram conduzidos experimentos utilizando ferramentas cerâmicas em diversas condições de corte. Os testes consistiram em apenas uma passada sobre uma peça de 400mm de comprimento, variando parâmetros como velocidade de corte, avanço e profundidade. Mesmo com condições significativamente severas, como velocidade de corte elevada, os valores de desgaste de flanco foram considerados baixos, destacando a resistência dessas ferramentas.

A Figura 16 apresenta os resultados obtidos por Surech e Basavarajappa (2014). Os dados mostram que, em condições próximas às utilizadas no presente trabalho, como a com velocidade de corte de 80 m/min, os valores de desgaste de flanco registrados são próximos, confirmando a consistência e confiabilidade do uso de ferramentas cerâmicas. No estudo indiano, a velocidade de 80 m/min gerou resultados compatíveis com o desgaste observado também na Condição 1 do presente trabalho, destacando a semelhança nos comportamentos das ferramentas mesmo em contextos distintos.

Sl. No.	Machining Parameters			Response factors	
	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$d$ (mm)	$VB_{max}$ (mm)	$R_a$ ( $\mu$ m)
1	140	0.14	0.30	0.065	0.74
2	80	0.08	0.15	0.050	0.65
3	200	0.08	0.45	0.069	0.42
4	80	0.08	0.45	0.055	0.82
5	80	0.20	0.45	0.065	1.14
6	140	0.14	0.30	0.065	0.74
7	200	0.20	0.15	0.096	0.76
8	80	0.20	0.15	0.058	0.86
9	200	0.08	0.15	0.072	0.36
10	200	0.20	0.45	0.092	0.80
11	140	0.24	0.30	0.075	0.98
12	140	0.14	0.55	0.086	0.82
13	140	0.14	0.05	0.060	0.54
14	238	0.14	0.30	0.105	0.55
15	140	0.04	0.30	0.065	0.44
16	42	0.14	0.30	0.048	1.30

Figura 16 – Resultados Experimentais para desgaste e rugosidade

Fonte: R. Surech e S. Basavarajappa (2014)

Outro fator interessante foi o desempenho das ferramentas em condições de corte extremamente severas, como a aplicação de uma velocidade de corte de 238 m/min no estudo de Surech e Basavarajappa. Mesmo nesse cenário, o desgaste de flanco registrado foi de apenas 0,105mm em 400mm de comprimento usinado, um valor notavelmente baixo considerando a agressividade das condições. Esses resultados evidenciam que mesmo sob parâmetros mais exigentes, as ferramentas cerâmicas mantêm um nível de desgaste controlado, confirmando sua alta resistência.

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões alcançadas com base nos resultados experimentais obtidos, complementados pela análise teórica e bibliográfica, além da interpretação dos dados coletados.

### 5.1 Conclusões

A conclusão deste estudo evidencia a influência significativa dos parâmetros de corte no desempenho da ferramenta e no desgaste observado durante o processo de usinagem. Ao comparar as duas condições testadas, ficou claro que a Condição 2, caracterizada pela redução da profundidade de corte de 0,25 mm para 0,15 mm, apresentou uma melhoria substancial na durabilidade da ferramenta.

Essa configuração permitiu alcançar comprimentos usinados maiores, variando de 1023,1 mm a 1159,9 mm, antes de atingir o limite de desgaste estipulado, enquanto na Condição 1, os comprimentos variaram de 840,5 mm a 1040,0 mm.

O maior comprimento usinado indica que a ferramenta apresentou uma vida superior na Condição 2, confirmando que a redução na profundidade de corte reduz as forças aplicadas durante a usinagem, diminuindo o desgaste e prolongando o desempenho eficiente da ferramenta.

Estudos futuros poderão aprofundar o entendimento sobre as interações entre os parâmetros e identificar diferentes influências deles no desenvolvimento de desgastes. Essas conclusões contribuem para a melhoria contínua dos processos de usinagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUNATTO, Silvio Francisco. **“Introdução ao Estudo dos Aços: Parte 4 - Classificação Segundo a Norma ABNT”**. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná. Outubro de 2016. Disponível em <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM229/Prof.Silvio/TM-052/INTRODU%C3%87%C3%83O%20AO%20ESTUDO%20DOS%20A%C3%87OS-Parte%204.pdf>>. Acesso em 22 de maio de 2024.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **“Ciência e Engenharia de Materiais”**. 10ª Ed. Rio de Janeiro: LTC integrante do Grupo Editorial Nacional, 2020.

CHIAVERINI, Vicente, **“Aços e Ferros fundidos”** 7º Edição – 1996, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM

CPDI UFRPE. **“Guia para Elaboração de Indicadores”**. Pró- Reitoria de Planejamento e Desenvolvimento Institucional da Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2021. Disponível em <[https://www.proplan.ufrpe.br/sites/ww2.proplan.ufrpe.br/files/Guia%20para%20elabora%C3%A7%C3%A3o%20de%20Indicadores%20-%20orienta%C3%A7%C3%B5es\\_0.pdf](https://www.proplan.ufrpe.br/sites/ww2.proplan.ufrpe.br/files/Guia%20para%20elabora%C3%A7%C3%A3o%20de%20Indicadores%20-%20orienta%C3%A7%C3%B5es_0.pdf)>. Acesso em 21 de setembro de 2024.

DUARTE, Pedro Miguel Carvalho. **“Caracterização do Torneamento e Aplicação de Conhecimento num Centro de Torneamento CNC Doosan na empresa Extra Motion”**. Mestrado em Engenharia Mecânica no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, julho de 2023. Disponível em <<https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/46543/1/Pedro-Miguel-Carvalho-Duarte.pdf>>. Acesso em 21 de setembro de 2024.

FAVORIT, Aços Especiais. **“Catálogo Online: Aços para Ferramentas”**. Aços para Ferramentas: AISI D2. Disponível em <<https://favorit.com.br/nossos-produtos/acos-para-ferramentas/aco-aisi-d2>>. Acesso em 22 de maio de 2024.

GERDAU AÇOMINAS S/A. **“Tipos de Aço e sua Classificação – normas SAE/AISI/ABNT”**. Você Mais Gerdau: Revista online. Fevereiro de 2024. Disponível em <<https://voce.mais.gerdau.com.br/automotivo/tipos-de-aco-e-sua-classificacao-normas-saeaisiabnt>>. Acesso em 22 de maio de 2024.

GOMES, Kamilla Catão. **“Comparativo entre ferramentas de materiais de nitreto de boro cúbico e cerâmica à base de alumina: Estudo de caso realizado em uma empresa do Polo Industrial de Manaus”**. Trabalho de Conclusão da Graduação, Universidade do Estado do Amazonas, 2021. Disponível em <<http://repositorioinstitucional.uea.edu.br/bitstream/riuea/4562/1/Comparativo%20entre%20ferramentas%20de%20materiais%20de%20nitreto%20de%20boro%20c%3%babico%20e%20cer%3%a2mica%20%3%a0%20base.pdf>>. Acesso em 21 de setembro de 2024.

GUNTER, Hartmut. **“Pesquisa Qualitativa Versus Pesquisa Quantitativa: Esta É a Questão?”**. Psicologia: Teoria e Pesquisa. Universidade de Brasília, agosto de 2006. Disponível em <<https://www.scielo.br/j/ptp/a/HMpC4d5cbXsdt6RqbrmZk3J/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em 03 de setembro de 2024.

HAMANO, Rafael da Cunha. **“Análise do Desgaste da Ferramenta de Corte no Fresamento do Aço SAE 4340”**. Projeto final apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, junho de 2017. Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro. Disponível em <[https://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Projeto%20Final%202017\\_1%20An%C3%A1lise%20Desgaste%20Ferramenta%20de%20Corte%20no%20Fresamento%20A%C3%A7o%20SAE%204340.pdf](https://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Projeto%20Final%202017_1%20An%C3%A1lise%20Desgaste%20Ferramenta%20de%20Corte%20no%20Fresamento%20A%C3%A7o%20SAE%204340.pdf)>. Acesso em 05 de agosto de 2024.

LIMA, Fabio de Freitas. **“Estudo do Desgaste de Ferramentas de Metal Duro e Cerâmicas no Torneamento do Inconel® 751 e Inconel 718®”**. Tese de Doutorado aprovada na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, novembro de 2012. Disponível em <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14749/1/EstudoDesgasteFerramentas.pdf>>. Acesso em 28 de maio de 2024.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **“Teoria da usinagem dos materiais”**. 3ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

MALÈRE, Ernesto Pedro. **“ANÁLISE COMPARATIVA DE FERRAMENTAS CERÂMICAS NA USINAGEM DE FERROS FUNDIDOS E AÇOS ENDURECIDOS”**, 2006, 153 f. Dissertação (Mestrado em Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006

MANARELLI, Flávio Henrique. “**Estudo do desgaste das ferramentas no microfresamento frontal**”. Dissertação de mestrado Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2018. Disponível em <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/857977d0-11d0-4dda-90c9-3362cc1218a8/content>>. Acesso em 05 de agosto de 2024.

MATSUMOTO, Hidekasu. “**Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Torneamento de Aços Endurecidos**”. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas SP, 1998.

MITSUBISHI MATERIALS. “**Efeitos das Condições de Corte para o Torneamento**”. Informações técnicas sobre classes para torneamentos, 2024. Disponível em <[https://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical\\_information/index.html](https://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/index.html)>. Acesso em 05 de agosto de 2024.

PÉREZ, Adriana Marcela. “**Manejo del estereomicroscópio**”. Sello Editorial Tecnológico de Antioquia, 2018. Disponível em <<https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/1472>>. Acesso em 21 de setembro de 2024.

PINEDO, Carlos Eduardo. “**Tratamentos térmicos e superficiais dos aços**”. 1. ed. São Paulo: Blücher, 2021. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 20 maio 2024.

SADÍLEK, M.; DUBSKÝ, J.; SADÍLKOVÁ, Z.; PORUBA, Z. “**Cutting Forces During Turning with Variable Depth of Cut**”. Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Republic, 2015. Disponível em <<http://surl.li/ysrobi>>. Acesso em 05 de novembro de 2024.

SANDVIK COROMANT S/A. “**Desgaste das Arestas de Corte**”. Revista online: Conhecimentos e Serviços, [s.d.]. Disponível em <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>>. Acesso em 05 de agosto de 2024.

SANDVIK COROMANT S/A. “**Materiais de Ferramentas de Corte**”. Revista online: Conhecimentos e Serviços, [s.d.]. Disponível em <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting-tool-materials>>. Acesso em 23 de maio de 2024.

SILVA, André L. V. C. e Silva; MEI, Paulo Roberto. “**Aços e ligas especiais**”. 4ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2021.

SILVA, D.; SIMON, F. O. (2005). **“Abordagem quantitativa de análise de dados de pesquisa: construção e validação de escala de atitude”**. Cadernos do CERU, 2(16), 11-27.

SILVA, Dirceu da; LOPES, Evandro Luiz; BRAGA, Sérgio Silva Junior. **“Pesquisa Quantitativa: Elementos, Paradigmas e Definições”**. Revista de Gestão e Secretariado SINSESP. Janeiro de 2014. Disponível em <[https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/297/pdf\\_36](https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/297/pdf_36)>. Acesso em 03 de setembro de 2024.

SILVA, Leonardo Roberto da; COELHO, Reginaldo Teixeira; CATAI, Rodrigo Eduardo. **“Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga “waspaloy”**. Metalurgia & Materiais. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 57(2): p. 109-114, abr. jun. 2004.

SILVA, Nilson Rodrigues da. **“Aplicações de Ferramentas Cerâmicas Experimentais à base de Alumina no Fresamento do Aço ABNT 4340 Endurecido”**. Tese de Doutorado aprovada na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá UNESP, 2021. Disponível em <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/1717cd04-bbe2-4b51-b7e2-e12e35309e52/content>>. Acesso em 05 de agosto de 2024.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **“Composição Química dos Aços”**. 1º Ed. São Paulo: Edgard Blücher, janeiro de 1989.

STEMMER, Caspar Erich. **“Ferramentas de Corte I”**. 3ª Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.

SURESH, R; BASAVARAJAPPA, S. **“Effect of Process Parameters on Tool Wear and Surface Roughness during Turning of Hardened Steel with Coated Ceramic Tool”**. International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering, AMME 2014. Disponível em <<http://surl.li/jklkwh>>. Acesso em 05 de novembro de 2024.

WFER FERRAMENTAS DE CORTE – SUMITOMO. **“Insertos de Cerâmica”**. Recomendações de uso e de catálogo, 2024. Disponível em <<https://www.wferferramentas.com.br/insertos-ceramica>>. Acesso em 05 de agosto de 2024.

**ANEXOS**