



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO

ERNANE FELIPE DIAS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA
FERRAMENTA DE PCBN NO TORNEAMENTO
DO AÇO ENDURECIDO AISI D2 EM CORTE
CONTÍNUO E INTERROMPIDO**

Belo Horizonte
2024

Ernane Felipe Dias

**Avaliação do Desempenho de uma Ferramenta de PCBN no Torneamento do Aço
Endurecido AISI D2 em Corte Contínuo e Interrompido**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos.

Linha de Pesquisa: Eficiência em Sistemas e Processos
Mecânicos

Belo Horizonte
2024

D541a Dias, Ernane Felipe

Avaliação do desempenho de uma ferramenta de PCBN no torneamento do aço endurecido AISI D2 em corte contínuo e interrompido / Ernane Felipe Dias. – 2024. 99 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientador: Sandro Cardoso Santos.

Banca examinadora: Sandro Cardoso Santos, Gilmar Cordeiro da Silva, Wagner Sade e Sandro da Costa Silva.

Bibliografia: f. 92-99.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Torneamento – Teses. 2. Ferramentas de corte de metal – Materiais – Teses. 3. Desgaste mecânico – Teses. 4. Aço – Processo a frio – Teses. 5. Rugosidade da superfície – Teses. I. Santos, Sandro Cardoso. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 621.902

Ernane Felipe Dias

Avaliação do Desempenho de uma Ferramenta de PCBN no Torneamento do Aço Endurecido
AISI D2 em Corte Contínuo e Interrompido

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de Pesquisa: Eficiência em Sistemas e Processos
Mecânicos

Belo Horizonte, 25 / Março / 2024

Resultado: **APROVADO**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos. (orientador)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC-MG

Prof. Dr. Wagner Sade

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

Prof. Dr. Sandro da Costa Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

Dedico este trabalho a minha esposa Giselda, e em especial a minha amada filha Ester que nasceu durante essa caminhada, me tornando Pai pela primeira vez.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me deu sabedoria, saúde e força para seguir em frente nessa árdua caminhada.

A minha esposa Giselda Oliveira pelo constante apoio, orações, compreensão e por ser minha grande incentivadora. Por nossa amada filha, Ester, alegria e bençãos nas nossas vidas.

Aos meus pais Gilmar e Ângela que me ensinaram a nunca desistir dos meus sonhos e meu irmão Diego pelo apoio e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos pelas conversas, diálogos e compreensão com tudo que vivi nessa jornada e por sempre acreditar no meu trabalho.

Ao parceiro de mestrado Caio Cesar, pelo apoio em toda a pesquisa, boas conversas e ajuda mútua essencial a esse trabalho. Também ao colega Thiago Querino pelo incentivo, ajuda e apoio em revisar meu trabalho.

Aos meus amigos, e pela equipe das unidades SENAI Euvaldo Lodi – Contagem e SENAI CETEF – Itaúna pela disponibilidade de equipamentos e apoio com as análises.

À Mapal do Brasil, em especial na pessoa do Sr. Luiz Junior e Sr. Adriano, pela doação e apoio das ferramentas de corte.

À LCF Indústria Mecânica, na pessoa do Sr. Sanderson Moura, pela doação dos aços AISI D2.

E à Metaltemper, na pessoa do Sr. Valdeci, por ter realizado os tratamentos térmicos nas amostras.

“Debaixo do céu há momento para tudo, e tempo certo para cada coisa.” Eclesiastes 3:1

RESUMO

Importantes avanços tecnológicos na indústria de fabricação mecânica têm cada vez mais gerado bons resultados com o torneamento de materiais endurecidos, utilizando ferramentas de nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN), principalmente em substituição aos processos abrasivos. A capacidade de atender aos requisitos do projeto sem a necessidade de múltiplos processos reflete em redução de custos e aumento da produtividade. Os aços ferramenta desempenham papéis variados e essenciais em diversas aplicações industriais, como matrizes e punções para conformação e corte. Melhorias no desempenho das ferramentas de corte são cruciais para resistir às condições tribológicas severas do processo de torneamento de materiais endurecidos. Neste contexto, esse trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de uma ferramenta de PCBN no torneamento do aço AISI D2 temperado e revenido, tanto em condições de corte contínuo quanto em corte interrompido, na operação de acabamento com usinagem a seco. Avaliou-se a rugosidade superficial nos parâmetros (R_a , R_t e R_z), os desgastes apresentados pela ferramenta, seus mecanismos e análise morfológica dos cavacos. Foram realizados ensaios com diferentes velocidades de corte (60, 130, 200 e 240 m/min), mantendo um avanço constante de 0,15 mm/rev e uma profundidade de corte de 0,2 mm. Os resultados indicaram que os desgastes mais evidentes foram cratera e flanco no corte contínuo, enquanto no corte interrompido houve a presença de lascamentos e falha catastrófica. Os mecanismos de desgaste, tais como adesão (*attrition*), abrasão e difusão foram observados com destaque. Além disso, os testes apontaram que o aumento do desgaste de flanco não necessariamente implicou em um aumento na rugosidade superficial, e que o mecanismo de desgaste se modificou com o aumento da velocidade de corte. Na condição de corte contínuo a ferramenta obteve desempenho mais satisfatório, com destaque nas velocidades de corte maiores (130, 200 e 240 m/min). Já no corte interrompido, há predominância de falha catastrófica principalmente nas faixas de 60 e 130 m/min e um desempenho melhor à 200 m/min dentro das faixas avaliadas.

Palavras-chave: Torneamento Duro. Ferramenta de PCBN. Desgaste de Ferramenta. Aço AISI D2. Rugosidade.

ABSTRACT

PERFORMANCE EVALUATION OF A PCBN TOOL IN TURNING HARDENED AISI D2 STEEL UNDER CONTINUOUS AND INTERRUPTED CUTTING

The continuous technological advancements in the mechanical manufacturing industry have increasingly yielded significant results in the turning of hardened materials, employing polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) tools, particularly as a substitute for abrasive processes. The ability to meet project requirements without the need for multiple processes reflects cost reduction and increased productivity. Tool steels play varied and essential roles in various industrial applications, such as dies and punches for forming and cutting. Improving the performance of cutting tools is crucial to withstand the severe tribological conditions of turning hardened materials. In this context, this study aims to evaluate the performance of a PCBN tool in turning hardened and tempered AISI D2 steel, both under continuous and interrupted cutting conditions, in finishing operations using dry machining. Surface roughness parameters (R_a , R_t , and R_z), tool wear, wear mechanisms, and morphological analysis of chips were evaluated. Tests were conducted at different cutting speeds (60, 130, 200, and 240 m/min), maintaining a constant feed rate of 0.15 mm/rev and a cutting depth of 0.2 mm. The results indicated that the most prominent wear was crater and flank wear in continuous cutting, while interrupted cutting exhibited chip formation and catastrophic failure. Wear mechanisms, such as adhesion (attrition), abrasion, and diffusion, were prominently observed. Furthermore, the tests revealed that an increase in flank wear did not necessarily result in increased surface roughness and that the wear mechanism changed with increased cutting speed. In continuous cutting conditions, the tool achieved more satisfactory performance, especially at higher cutting speeds (130, 200, and 240 m/min). In interrupted cutting, there was a predominance of catastrophic failure, especially at 60 and 130 m/min, with better performance at 200 m/min within the evaluated ranges.

Keywords: Hard turning. PCBN tools. Tool wear. AISI D2 Steel. Roughness

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparação das Características no Torneamento Duro e Retificação	22
Figura 2 - Componentes de Transmissão Automotiva.....	23
Figura 3 - Desgaste de Flanco Influenciado pela Dureza no Torneamento do Aço AISI D2 .	24
Figura 4 - Topografias Obtidas pelo Processo de a) Torneamento Duro e b) Retificação	25
Figura 5 - Mecanismo de Formação do Cavaco.....	28
Figura 6 - Simulação e Valores Obtidos nos Ensaios de Comparação entre um Aço Ferramenta Recozido e Temperado	29
Figura 7 - Espessura do Cavaco - MEV.....	30
Figura 8 – Micrografia das Ferramentas de PCBN – a) Baixo Teor de CBN e b) Alto Teor de CBN.....	34
Figura 9 - Microestruturas a) <i>Inconel</i> 718 e b) CBN	34
Figura 10 - Desgaste de Flanco e Cratera na Usinagem de um Aço Rolamento AISI 5210037	
Figura 11 - Desgaste de Entalhe	37
Figura 12 - Curva do Comportamento do Desgaste da Ferramenta em Função do Tempo .	38
Figura 13 - Diagrama dos Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Corte em Função da Temperatura	39
Figura 14 - Parâmetros de Medição dos Desgastes das Ferramentas (ISO NBR 3685:2017)	41
Figura 15 - Desgaste Ocorrido nas Ferramentas de PCBN no Torneamento de um Aço Cementado.....	42
Figura 16 – Tempo de Vida das Ferramentas com e sem Revestimentos – $VB_{Bmáx} = 0,3mm$	43
Figura 17 - Representação Gráfica dos Parâmetros de Medição R_a , R_t e R_z	45
Figura 18 – Rugosidade Média R_a em Função do Comprimento de Avaliação	46
Figura 19 - Rugosidade Média R_a e a Variação da MRR	47
Figura 20 - Fluxograma da Metodologia de Trabalho.....	48
Figura 21 - Máquina Ferramenta Utilizada nos Experimentos.....	49
Figura 22 - Fixação do Corpo de Prova na Placa com Castanhas Usinadas	50
Figura 23 - Geometria da Ferramenta Classe BZN9000	51
Figura 24 - Geometria dos Corpos de Prova: 1 Corte Interrompido e 2 Corte Contínuo.....	53
Figura 25 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-210.....	54
Figura 26 - Região de Retirada das Amostras	55
Figura 27 - Preparação dos Corpos de Prova.....	56
Figura 28 - a) Eletroerosão a Fio b) Corpos de Prova Usinados	57

Figura 29 - Usinagem Eletroerosão a Fio em CP (Corte Interrompido)	58
Figura 30 - Trajetória da Ferramenta no Faceamento de A para B	59
Figura 31 - Análise Metalográfica AISI D2 – Sem Tratamento	63
Figura 32- Microestrutura do Aço AISI D2 - Tratado Termicamente.....	63
Figura 33 - Evolução do $VB_{Bmáx}$ em Função do Comprimento Usinado (l_f) no Corte Contínuo	64
Figura 34 Evolução do $VB_{Bmáx}$ em Função do Comprimento Usinado (l_f) no Corte Interrompido	65
Figura 35 - Morfologia do Desgaste da Ferramenta em Corte Contínuo com Velocidade de Corte 60 m/min	66
Figura 36 - Estado Final da Ferramenta e Partículas de Material Aderido com Indicação de Espectro EDS dos Pontos 1 e 2 Após o Último Passe – (Corte Contínuo – Velocidade de Corte 60 m/min).....	68
Figura 37 Estado Final da Superfície de Saída e Principal de Folga da Ferramenta Obtidas por MEV – (Corte Contínuo – Velocidade de Corte 130 m/min)	69
Figura 38 – Análise (MEV) dos Pontos Analisados – Corte Contínuo $V_c = 130$ m/min	70
Figura 39 - Análise (EDS) dos pontos 1 e 2 – Corte Contínuo $V_c = 130$ m/min	70
Figura 40 - Análise (EDS) dos pontos 3 e 4 – Corte Contínuo $V_c = 130$ m/min.....	71
Figura 41 - Estado Final da Superfície de Saída e Principal de Folga da Ferramenta: a) com Microscópio Ótico b) com (MEV) – (Corte Contínuo – Velocidade de Corte 200 m/min)	72
Figura 42 - Comparação da Morfologia da Ferramenta: a) Ferramenta Nova b) Estado Final	72
Figura 43- Estado Final da Superfície de Saída e Principal de Folga da Ferramenta Obtidas por MEV– (Corte Contínuo – Velocidade de Corte 240 m/min)	73
Figura 44 - Evolução do Desgaste de Flanco Máximo em Função do Comprimento Usinado com as Imagens Registradas.....	74
Figura 45 – Estado Final da Ferramenta – (Corte contínuo – Velocidade de Corte 60 m/min)	75
Figura 46 - Estado Final da Ferramenta – (Corte contínuo – Velocidade de Corte 130 m/min)	76
Figura 47 - Estado Final da Ferramenta – (Corte contínuo – Velocidade de Corte 200 m/min)	77
Figura 48 - Estado Final da Ferramenta – (Corte contínuo – Velocidade de Corte 240 m/min)	78
Figura 49 - Efeito da Velocidade de Corte na Rugosidade Superficial do Aço AISI D2 nos Parâmetros R_a , R_z e R_t no Corte Contínuo.....	79

Figura 50 - Rugosidade média (R_a) em Função da Variação das Velocidades de Corte na Condição de Corte Contínuo.....	80
Figura 51 - Comparação da Rugosidade Média (R_a) em Função das Velocidades de Corte no Primeiro e Último Passe em Corte Contínuo.....	81
Figura 52 - Evolução da Rugosidade Média (R_a) em Função do Comprimento Usinado (l_f) para as Velocidades de Corte Avaliadas.....	81
Figura 53 – Evolução da Rugosidade Altura Máxima do Perfil (R_z) em Função do Comprimento Usinado (l_f) para as Velocidades de Corte Avaliadas.....	82
Figura 54 - Evolução da Rugosidade Altura Total do Perfil (R_t), em Função do Comprimento Usinado (l_f) para as Velocidades de Corte Avaliadas.....	83
Figura 55 – Evolução da Rugosidade Média (R_a) em Função dos Passes - Corte Interrompido	84
Figura 56 - Efeito da Velocidade de Corte na Rugosidade Superficial do Aço AISI D2 nos Parâmetros R_a , R_z e R_t no Corte Interrompido	85
Figura 57 - Comparação da Evolução da Rugosidade Média (R_a) em Função do Comprimento Usinado (l_f) na Condição de Corte Contínuo e Interrompido a $v_c = 200\text{m/min}$	86
Figura 58 - Morfologia do Cavaco em Corte Contínuo nas Velocidades de Corte de 60 e 130 m/min.....	87
Figura 59 Morfologia do Cavaco em Corte Contínuo nas Velocidades de Corte de 200 e 240 m/min.....	87
Figura 60 - Morfologia do Cavaco em Corte Interrompido nas Velocidades de Corte de 60 e 130 m/min.....	88
Figura 61 - Morfologia do Cavaco em Corte Interrompido nas Velocidades de Corte de 200 e 240 m/min.....	89

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química do Aço AISI D2.....	26
Tabela 2 - Parâmetros de Corte dos Procedimentos Experimentais	60
Tabela 3 - Matriz de Experimentos com Réplica.....	61
Tabela 4 - Espectrometria AISI D2.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	- <i>American Iron and Steel Institute</i>
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETEF	- Centro Tecnológico de Fundição Marcelino Corradi
CBN	- Nitreto Cúbico de Boro
CNC	- Comando Numérico Computadorizado
CVD	- Deposição Química a Vapor
DIN	- <i>German Institute for Standardization</i>
HRC	- Dureza Rockwell – Escala C
HV	- Dureza Vickers
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
LAMAT	- Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
PCBN	- Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
PCD	- Policristalino de Diamante
PVD	- Deposição Física a Vapor
SENAI	- Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	- Óxido de alumínio
a_p	- Profundidade de corte
CVD	- Deposição química a vapor
f	- Avanço
KB	- Largura da cratera
KF	- Distância frontal entre o desgaste de cratera e flanco
KM	- Distância do centro da cratera a aresta de corte
KT	- Profundidade de cratera
l_f	- Comprimento usinado
R_a	- Desvio aritmético médio (μm)
R_t	- Altura total do perfil (μm)
R_z	- Altura máxima do perfil (μm)
TiCN	- Carbo-nitreto de titânio
TiN	- Nitreto de titânio
TiAl	- Nitreto de alumínio e titânio
VBB	- Desgaste de flanco médio
$VB_{\text{Bmáx}}$	- Desgaste de flanco máximo
VBC	- Desgaste secundária
VB_N	- Desgaste de entalhe
v_c	- Velocidade de corte
WC	- Carboneto de tungstênio
$\varnothing$	- Diâmetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivo Geral.....	19
1.2	Objetivos Específicos	19
2	DESENVOLVIMENTO.....	21
2.1	Torneamento de Aços Endurecidos	21
2.1.1	Aço AISI D2.....	26
2.2	Mecanismo de Formação dos Cavacos.....	27
2.3	Ferramentas de Usinagem	30
2.3.1	Metal Duro.....	31
2.3.2	Cerâmicas	32
2.3.3	Nitreto Cúbico de Boro	32
2.4	Desgaste das Ferramentas de Corte.....	35
2.5	Mecanismo de Desgaste	38
2.6	Crítério de Fim de Vida da Ferramenta.....	40
2.7	Integridade Superficial.....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1	Equipamentos e Materiais	49
3.1.1	Máquina-Ferramenta	49
3.1.2	Sistema de Fixação.....	49
3.1.3	Ferramenta de Corte	50
3.1.4	Corpo de Prova	51
3.1.5	Medição de Dureza	54
3.1.6	Rugosidade Superficial.....	54
3.1.7	Análise Química da Amostra	55
3.1.8	Tratamento Térmico	55
3.1.9	Avaliação da Microestrutura	55

3.1.10	Desgastes das Ferramentas.....	56
3.2	Metodologia	56
3.2.1	Parâmetros de Corte	59
3.2.2	Matriz de experimentos	60
4	RESULTADOS	62
4.1	Análise da Composição Química, Metalográfica e Dureza.....	62
4.2	Análise dos Desgastes da Ferramenta de Corte	64
4.2.1	Corte Contínuo – Velocidade de Corte 60 m/min.....	66
4.2.2	Corte Contínuo – Velocidade de Corte 130 m/min.....	69
4.2.3	Corte Contínuo – Velocidade de Corte 200 m/min.....	71
4.2.4	Corte Contínuo – Velocidade de Corte 240 m/min.....	72
4.2.5	Corte Interrompido – Velocidade de Corte 60 m/min	75
4.2.6	Corte Interrompido – Velocidade de Corte 130 m/min	75
4.2.7	Corte Interrompido – Velocidade de Corte 200 m/min	76
4.2.8	Corte Interrompido – Velocidade de Corte 240 m/min	77
4.3	Análise da Rugosidade.....	78
4.3.1	Avaliação das Rugosidades em Corte Contínuo.....	79
4.3.2	Avaliação das Rugosidades em Corte Interrompido	83
4.3.3	Comparação das Rugosidades - Corte Contínuo e Corte Interrompido	85
4.4	Análise Morfológica do Cavaco	86
5	CONCLUSÃO	90
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
	REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

A indústria mecânica possui vários processos de fabricação que necessitam de atualização e novas tecnologias constantemente. Entender o comportamento fabril, suas características bem como a maneira adequada para determinadas situações é uma tarefa muito importante. A usinagem mecânica é um dos processos de fabricação mais empregado no mundo atuando de maneira significativa na manufatura industrial, sendo capaz de dar forma a uma matéria-prima para que se atinja a um requisito funcional. (MACHADO *et al.*, 2015).

Com o mercado cada vez mais competitivo, melhorar os processos e a qualidade dos produtos e serviços é essencial para manter a competitividade. Para que isso ocorra, é necessário realizar um projeto, validar as informações, escolher o material adequado e definir em qual das inúmeras operações ele será fabricado. Ferraresi (2014) afirma que a usinagem tem o objetivo de dar dimensões, acabamento e forma as peças produzindo cavaco, de maneira em que esses três fatores podem ou não estar combinados. Desta forma, para cada tipo de projeto deve-se realizar uma escolha racional do processo adequado, que trará resultados satisfatórios com o objetivo de se conseguir ganhos de produtividade, maior qualidade e conseqüentemente diminuição dos custos de fabricação.

O torneamento de aços endurecidos desde a década de 1980 vem sendo estudado e otimizado sua aplicação. Desde este período até os dias atuais, têm se mostrado satisfatório os resultados, como por exemplo, garantir integridade superficial dos componentes dentro de valores especificados nos projetos, podendo substituir processos de retificação ou em alguns casos, de forma combinada. (BOING *et al.*, 2018). Tudo isso graças ao desenvolvimento de novas ferramentas de corte e ao aprimoramento de materiais como, por exemplo, novos revestimentos, refino de grãos, geometrias que favorecem o corte, além de garantir uma boa vida útil a essas ferramentas. Importante também ressaltar que o desenvolvimento de máquinas-ferramentas com mais rigidez, estabilidade dinâmica e maiores potências, contribuem significativamente para alcançar as especificações dos projetos, como precisão dimensional e baixas rugosidades. (HOSSEINI *et al.*, 2014).

Diversos autores dedicados aos estudos de torneamento de aços endurecidos destacam bons resultados de usinagem com a utilização de ferramentas de metal duro e nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN, do inglês *Poly Crystalline Cubic Boron Nitride*). Gutnichenko *et al.*, (2021) estudaram melhorias na utilização de ferramentas de PCBN no

torneamento de cubos de engrenagens helicoidais com camadas cementadas até 60-63 HRC caracterizando principalmente dois parâmetros de desgaste de ferramentas, sendo eles: o desgaste de flanco e o desgaste de cratera, que segundo os autores são típicos em torneamento duro com esse material de ferramenta. No estudo de Boing *et.al* (2021), foi observado o impacto da austenita retida em aços cementados no desgaste das ferramentas de PCBN em peças ligadas à componentes para transmissão na indústria automotiva observando também esses desgastes, além dos mecanismos de abrasão e difusão. Já os autores Khan, Sarmad Ali *et al.*, (2020) avaliaram o desempenho de desgaste de pastilhas de carboneto metálico, que foram modificadas para o torneamento de um aço ferramenta conseguindo realizar desbaste e acabamento em uma única etapa, promovendo uma usinagem sustentável.

Nesse escopo, é importante que se realize pesquisas em que seja estudado o comportamento dessas ferramentas ao usinar aços endurecidos. Desta maneira, é possível levantar algumas questões: As ferramentas de PCBN, em dadas condições tribológicas severas, tendem a ter o mesmo desempenho para condições de cortes diferentes? A porcentagem de conteúdo de CBN, bem como o material ligante, na maioria dos casos cerâmicos, tem influência na resistência a abrasão e ao impacto na usinagem de aços ferramenta endurecidos por têmpera e revenimento?

Nesse trabalho avaliou-se o desempenho de uma ferramenta de PCBN, com 75% em volume de CBN ligados a uma matriz de Titânio (Ti), no torneamento do aço endurecido AISI D2 nas condições de corte contínuo e interrompido. Buscou-se investigar os mecanismos e tipos de desgastes, além da integridade superficial do material, com intuito de obter resultados que possam contribuir com a escolha correta da classe de CBN afim de proporcionar uma seleção mais assertiva, diminuindo os custos de fabricação e aumentando a produtividade.

1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar e avaliar o desempenho de uma ferramenta de PCBN no torneamento a seco de um aço endurecido AISI D2 nas condições de corte interrompido e contínuo, com base na avaliação dos parâmetros de corte, proporcionando uma maior compreensão dos fenômenos e, assim, contribuir para o desenvolvimento de ferramentas com propriedades melhoradas.

1.2 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Avaliar os mecanismos e formas de desgastes ocorridos na ferramenta de PCBN durante o torneamento do aço endurecido AISI D2.
- Analisar a integridade superficial com avaliação de parâmetros principalmente como rugosidade, dureza e a microestrutura da peça usinada.
- Comparar o desempenho da ferramenta de PCBN em relação a resultados disponíveis em literatura.
- Avaliar o desempenho da ferramenta utilizada nos ensaios na condição de corte contínuo e interrompido.

2 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, apresentam-se os estudos mais recentes do torneamento de materiais endurecidos. O objetivo é trazer definições, características e as principais variáveis que influenciam no processo. São abordados aspectos do torneamento de aços endurecidos tipicamente utilizados na indústria. Discute-se também os mecanismos de formação do cavaco, os materiais das ferramentas de corte, o desgaste das ferramentas de usinagem e seus mecanismos. Além disso, é realizada uma abordagem sobre os critérios de fim de vida das ferramentas e a integridade superficial dos materiais usinados.

2.1 Torneamento de Aços Endurecidos

O torneamento de aços endurecidos vem sendo aplicado em grande parte da indústria por apresentar bons resultados frente a outros processos, como a retificação, especificadamente na indústria automotiva e de moldes e matrizes (MONDAL *et al.*, 2016). Além disso, permite que os fabricantes executem de maneira simplificada seus processos e alcancem bons resultados de qualidade e integridade superficial (YOUSEFI, Sasan e ZOHOOR, Mehdi, 2019).

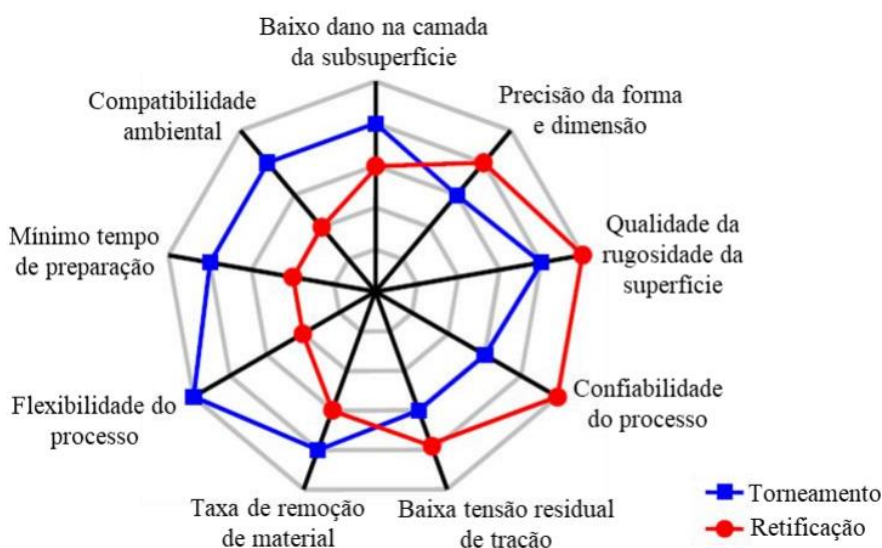
De acordo com Machado *et al.*, (2015), é definido como torneamento de materiais endurecidos aqueles que possuem dureza acima de 45 HRC, durezas que, até nas últimas décadas, eram usinadas apenas em processos ditos como abrasivos. Além disso, as ferramentas devem ser selecionadas de maneira correta. É importante salientar que as máquinas-ferramentas tem um papel muito significativo em todo o processo. Esses equipamentos devem apresentar características que garantam uma usinagem satisfatória, tais como estabilidade dinâmica para garantir que ruídos não prejudiquem o trabalho, acarretando, por exemplo, em vibração excessiva, folga no curso e potência suficiente para atingir aos parâmetros de corte exigidos (BOING, 2018).

Os processos empregados em operações de acabamento em materiais endurecidos eram realizados por processos abrasivos, como a retificação. Em função dos avanços tecnológicos, que conferiram uma maior rigidez e estabilidade dinâmica das máquinas-ferramentas, alinhados a uma melhora dos materiais das ferramentas de corte de elevada dureza e resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, tornou-se possível a usinagem desses materiais pelo processo de torneamento (ASTAKHOV e DAVIM, 2011). De acordo

com Grzesik (2018), o torneamento duro é capaz de produzir peças com o acabamento superficial comparáveis à retificação.

A comparação entre os processos de torneamento e retificação, foi assunto de um trabalho de Klocke *et al.*, (2005), que discutiram os resultados de pesquisas e demandas da indústria. Foi avaliado critérios qualitativos na funcionalidade da peça que é apresentado de maneira resumida na Figura 1. Nota-se a relação de flexibilidade do torneamento é maior na comparação com a retificação, e que em termos de qualidade da rugosidade da superfície os processos abrasivos ainda sobressaem.

Figura 1 - Comparação das Características no Torneamento Duro e Retificação



Fonte: Adaptado de Klocke *et al.*, (2005) *apud* POLLY (2019)

Os mais variados materiais de ferramentas, como metal duro, cerâmicas, diamante policristalino (PCD) e nitreto cúbico de boro (CBN), tem grande uso na usinagem de materiais endurecidos. O último é apontado como uma tendência mundial, como melhor escolha (KUMAR *et al.*, 2019). Esse fato se dá devido a sua boa condutividade térmica e dureza se comparada as outras ferramentas.

Atualmente, há um grande desafio realizar o torneamento nestas condições de maneira que se atenda as demandas exigidas nos projetos, e que a usinagem seja economicamente viável. De acordo com Anupam, A. e Manas, D. (2018) o custo com a usinagem com ferramentas de PCBN é maior se comparado ao metal duro devido ao alto valor das ferramentas de corte. Sendo assim, uma alternativa apontada por eles é a utilização de

ferramentas de metal duro com revestimentos seletivos que pode apresentar custos de um décimo das ferramentas a base de nitreto cúbico de boro (CBN).

Nos processos de torneamento duro, pequenas profundidades de cortes são utilizadas devido a dureza dos materiais que são usinados. Geralmente, esses valores de profundidade de corte são menores ou igual ao raio da ponta da pastilha (YOUSEFI, Sasan e ZOHOOR, Mehdi, 2019). Em alguns casos, como por exemplo, nos estudos de Revel *et al.*, (2016) em que foi realizado um torneamento de alta precisão no aço AISI 52100 endurecido (62 HRC), em que a rugosidade média (R_a) alcançada esteve na faixa de 0,1-0,2 μm e profundidade de corte de 5 a 10 μm , concluiu-se que o torneamento rígido de precisão induz tensões residuais compressivas tanto superficiais quanto subsuperficiais, provocadas pelo aumento da velocidade de corte.

Vários componentes industriais como eixos, engrenagens, rolamentos devem ser fabricados com aços endurecidos, pois estão submetidos a diversos tipos de solicitações e devem suportar uma quantidade significativa de esforços. Além disso, eles devem apresentar como características, boa resistência ao desgaste abrasivo e resistir tensões de origens térmicas e mecânicas. Na indústria automotiva, os elementos que compõe o sistema de transmissão de um veículo estão sujeitos a tal condição. Na Figura 2 é apresentado exemplos desses componentes.

Figura 2 - Componentes de Transmissão Automotiva

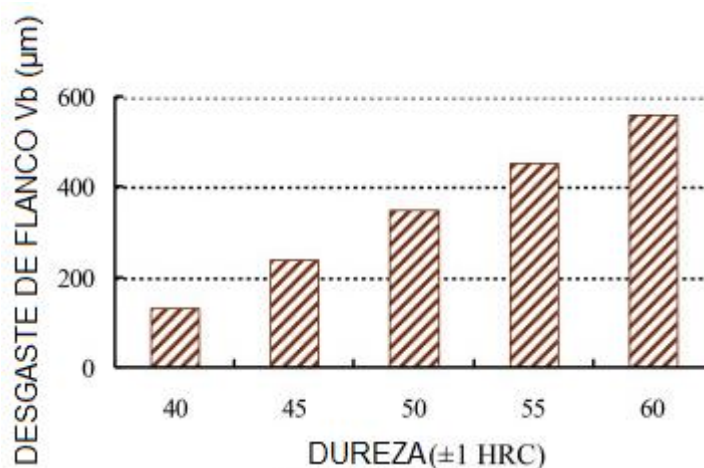


Fonte: MLFREE (2017)

Os autores Khan, Sarmad Ali *et al.*, (2018), compararam uma pastilha convencional com outras de geometria de aresta alisadoras a fim de observar o comportamento dos parâmetros de saída na usinagem do aço AISI D2 tratado termicamente com dois valores de dureza (55 e 60 HRC). Indo de encontro a outros autores, eles concluíram que a dureza da peça é o parâmetro que tem mais influência na vida útil das ferramentas. Além disso, pastilhas

alisadoras tem bons resultados para a rugosidade superficial e os valores aumentaram mais de duas vezes quando se utilizou insertos convencionais. No trabalho de Linhu Tang *et al.*, (2019), o desempenho e os mecanismos de desgaste foram analisados em uma ferramenta de corte de PCBN no torneamento do aço temperado AISI D2 usinado a seco. Além de dureza elevada (40-60HRC), parâmetros de corte como velocidade de corte de 250 m/min, avanço de 0,1 mm/rev e uma profundidade de corte constante de 0,15 mm foram aplicados. Em um dos seus resultados (Figura 3) é possível observar que o desgaste de flanco aumenta linearmente com o aumento da dureza do aço AISI D2.

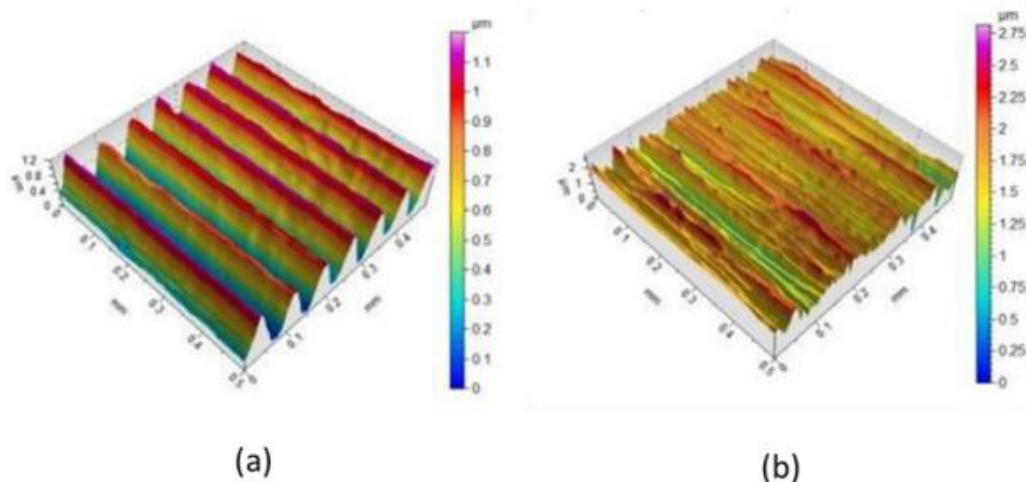
Figura 3 - Desgaste de Flanco Influenciado pela Dureza no Torneamento do Aço AISI D2



Fonte: LINHU TANG *et al.*, (2019)

Ainda que o torneamento de aço endurecidos demonstre diversas vantagens em relação ao processo de retificação, não se pode afirmar que esse processo substitui todas as operações práticas nas retificadoras. Isso porque o torneamento e retificação bem como outras operações de acabamento abrasivo, geram diferentes estruturas superficiais, que podem influenciar em suas propriedades funcionais devido a essas distintas características topográficas. (GRZESIK, W.; RECH, J.; ŽAK, K., 2015). Na Figura 4 é possível perceber essas diferentes topografias, obtidas através do torneamento duro e da retificação. Grzesik *et al.*, (2014), apresentaram um estudo comparando esses acabamentos.

Figura 4 - Topografias Obtidas pelo Processo de a) Torneamento Duro e b) Retificação



Fonte: Grzesik *et al.*, (2014)

De acordo com os autores, é possível notar que mesmo que essas análises mostraram que os parâmetros de rugosidade (R_a e R_t) medidos são quase os mesmos, existe uma dissimilaridade entre as topografias de superfície torneada e a retificada, que podem atender a diferentes requisitos de projetos.

O estudo das características superficiais e subsuperficiais dos materiais que são obtidos por processos de usinagem, tais como, microdureza, análise da tensão residual, rugosidade e transformação de fase, se torna muito importante na busca e no entendimento dos fenômenos envolvidos no processo, além da redução das falhas de componentes finais. O desempenho desses componentes depende fortemente das características e suas propriedades das superfícies finais obtidas (KAYNAK, Y.; LU, T.; JAWAHIR, I.S., 2014). A rugosidade da superfície é o resultado mais comumente visível de quaisquer processos de usinagem que pode ser usado para caracterizar a qualidade do processo, pois determina as propriedades funcionais dos componentes usinados. Isso ocorre porque a rugosidade da superfície altera a tribologia de contato, que é a chave para processos que vão desde o desgaste, adesão a fricção, lubrificação e sistemas de revestimento (BUZIO *et al.*, 2003). Isso, por sua vez, influencia a resistência à fadiga, resistência à fluência, resistência à corrosão e vida útil do componente usinado. Deste modo, adequar e controlar a rugosidade da superficial usinada a um alto nível de precisão é um requisito fundamental para muitas aplicações relevantes (ASAKURA *et al.*, 2014).

2.1.1 Aço AISI D2

O aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2, é um aço grande aplicação no segmento metalmeccânico no que diz respeito a indústria de conformação e corte a frio (GGD METALS, 2022). Pertencente a série D (*Die steels*), possuindo elevada resistência ao desgaste, fato devido a presença de carbonetos. É um material que pode ser tratado termicamente aumentando sua dureza e garantindo boa resistência a fratura. De acordo com a Villares Metals (2022), é classificado em outras normas e similares com as seguintes tipificações: ASTM A 681 Tipo D2; ABNT D2; WNr 1.2379; DIN X155CrVMo12 1. Possui características de alta estabilidade dimensional, além suportar muito bem ao desgaste em condições abrasivas. Parte de sua aplicabilidade se dá em ferramentas que exijam características como alta resistência ao desgaste encontrado em matrizes para estampagem, repuxo e cunhagem, rolos laminadores de roscas, centros para tornos, punções e calibres. Após têmpera e revenimento tem durezas típicas de utilização entre 56 e 60 HRC. Na Tabela 1 é apresentada sua composição química.

Tabela 1 - Composição Química do Aço AISI D2

C %	Mn %	Cr %	Mo %	W %	V %	OUTROS %
1,50	0,35	12,00	0,78	-	0,80	-

Fonte: VILLARES METALS, (2022)

A usinagem e conformação de metais são essenciais para a produção de peças metálicas em muitas indústrias. Por exemplo, a indústria automobilística tem visto um aumento na produção de automóveis, o que levou a um aumento na demanda por aço ferramenta. Aumentos semelhantes na demanda também foram observados em outras indústrias, como aeroespacial, transporte e indústrias de precisão. (ALGARNI, 2019). Nos trabalhos de Jeong Ye-Eun e Do-Sik Shim (2022), foram realizados adição de um pó de FeCrMoVW através de manufatura aditiva em um substrato AISI, utilizando um processo de deposição de energia direcionada. Avaliaram-se as propriedades mecânicas e metalúrgicas do FeCrMoVW depositado no substrato do aço AISI D2 por meio de observações microestruturais e ensaios mecânicos de dureza, impacto, compressão e desgaste. Em resumo, os resultados destacaram a viabilidade do processo de revestimento duro utilizando pó de FeCrMoVW, evidenciando ganhos significativos em dureza, resistência ao desgaste e compressão,

sugerindo sua aplicabilidade para melhorar o desempenho de ferramentas e moldes em ambientes adversos.

2.2 Mecanismo de Formação dos Cavacos

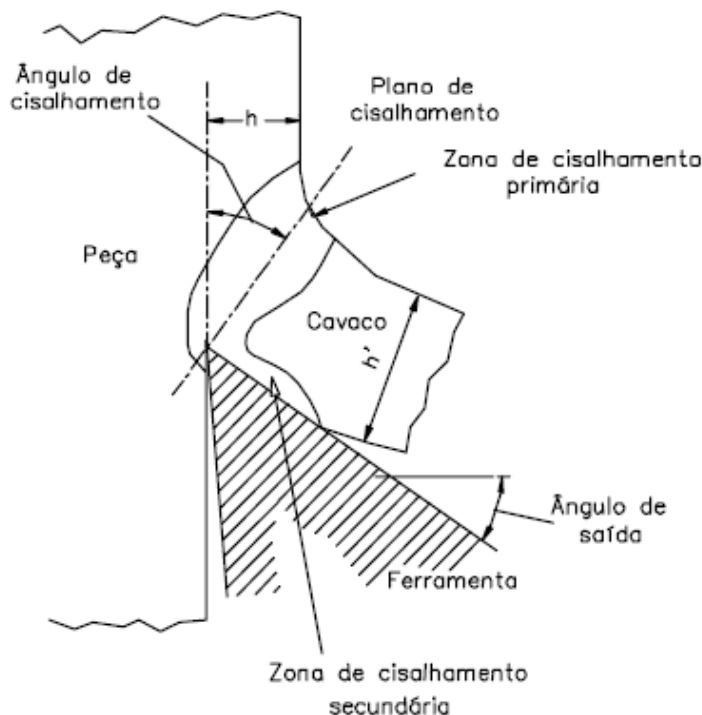
O estudo da formação do cavaco é importante, pois proporciona um melhor entendimento dos processos de usinagem. Tem influência diretamente nos desgastes das ferramentas, no acabamento superficial, esforço de corte, calor gerado entre outros. De acordo com Machado *et al.*, (2015), é sabido que o cavaco é formado em altas velocidades de deformação, culminando na ruptura do material da peça.

Para entender de uma maneira melhor, pode-se dividir em quatro etapas, em condições ditas normais, com ferramentas comuns de metal duro ou aço rápido (FERRARESI, 2014), são elas:

- 1) Etapa do recalque inicial, em função da penetração da ferramenta na peça (cunha cortante), uma quantidade pequena de material é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.
- 2) Etapa de deformação e ruptura, depois que ocorre o recalque, o material sofre deformação elástica e, e seguida, uma deformação plástica, que aumenta progressivamente até que as tensões cisalhantes sejam grandes suficiente para promover um deslizamento entre a porção do material recalcado e a peça. É importante ainda ressaltar, que esses deslizamentos ocorrem nos planos de cisalhamentos dos cristais dessa pequena quantidade de material que foi recalcada.

Na Figura 5, pode-se observar o mecanismo de formação do cavaco.

Figura 5 - Mecanismo de Formação do Cavaco



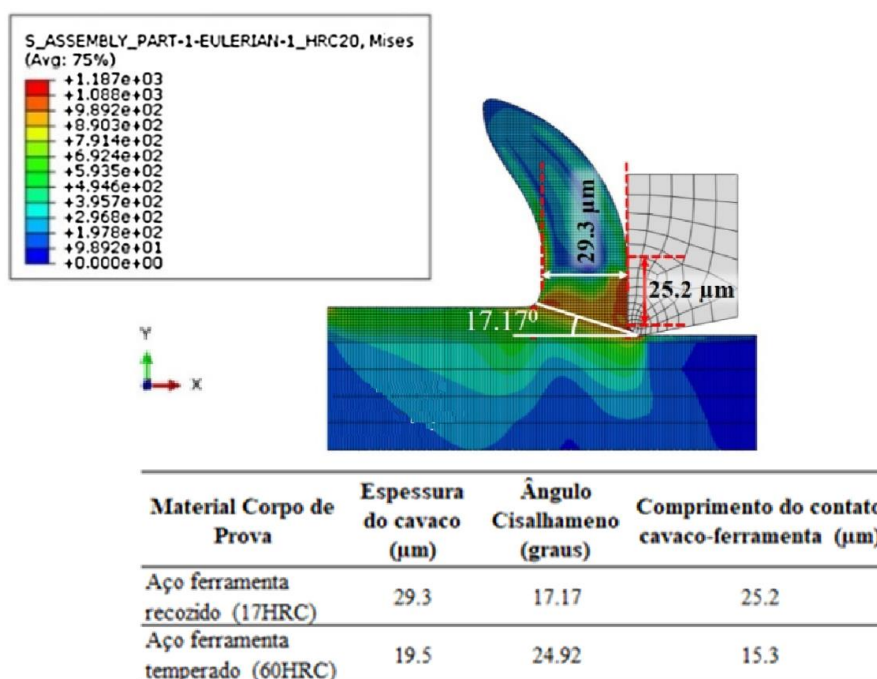
Fonte: TRENT e WRIGHT, (2000).

- 3) Etapa da ruptura parcial ou completa na região onde ocorre o cisalhamento, devido a continuação da penetração da ferramenta de corte. De acordo com as características de cada material e dos parâmetros de corte que são utilizados, materiais que possuem características altamente deformáveis, o cavaco produzido geralmente é contínuo, e para materiais frágeis o tipo de cavado gerado, é um cavaco de ruptura ou de cisalhamento.
- 4) Etapa de saída do cavaco, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso ocorre, uma nova lamela do material está se formando e passará pelos mesmos processos.

Na usinagem de aços endurecidos, são formados cavacos de lamelas em decorrência das propriedades dos materiais, denominados dentes de serra. (KLOKER, 2011). De acordo com Astakhov (2011), estudar e discutir a essência dos fenômenos físico e mecânicos no torneamento de materiais endurecidos, tem uma grande importância tanto para a compreensão científica dos fenômenos do processo, e claro, para as aplicações industriais.

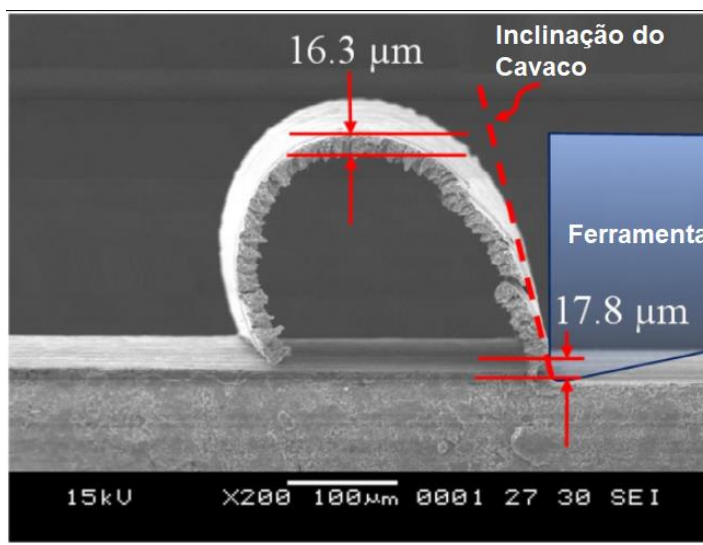
Os autores Arefin, Shamsul *et al.*, (2021), realizaram um estudo do mecanismo de formação de cavacos através de simulação numérica e de procedimento experimental. Os mecanismos foram investigados analisando as zonas de deformação primária e secundária de alguns aços com diferentes valores de durezas. Um dos resultados comparados pelos autores, foi da simulação realizada para um aço ferramenta recozido com baixa dureza 17 HRC, com um aço ferramenta temperado de elevada dureza 60 HRC. É afirmado que, a espessura do cavaco aço recozido é muito maior que o aço ferramenta endurecido. Os resultados sugeriram que o aumento da dureza do material da peça de trabalho com as mesmas características, produz um cavaco mais fino com um ângulo de cisalhamento maior. Pode-se observar a simulação realizada na Figura 6, a imagem obtida experimentalmente na Figura 7, além dos respectivos valores encontrados por ambos os métodos.

Figura 6 - Simulação e Valores Obtidos nos Ensaios de Comparação entre um Aço Ferramenta Recozido e Temperado



Fonte: Adaptado de AREFIN, Shamsul *et al.*, (2021).

Figura 7 - Espessura do Cavaco - MEV



Fonte: Adaptado de AREFIN, Shamsul *et al.*, (2021).

Nos testes experimentais, os autores conseguiram valores bem próximos aos da simulação, como por exemplo, a espessura do cavaco medido através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para o aço ferramenta endurecido foi de 16,3 μm (Figura 7) em comparação a simulação que encontrou 19,5 μm , observado anteriormente.

2.3 Ferramentas de Usinagem

As ferramentas de corte empregadas no torneamento de aços endurecidos, precisam apresentar algumas propriedades especiais, como elevada dureza em altas temperaturas, boas características quanto ao seu desempenho e resistir aos esforços que serão submetidas, além de estabilidade térmica e química, e maior tenacidade para suportar as forças geradas durante desenvolvidas na região do corte. (KUMAR e PATEL, 2018). Os materiais de ferramentas desenvolvidos com diferentes composições químicas, refinamento de grãos e revestimentos diversos, trazem avanços para a usinagem, o que torna possível o corte de materiais com elevada dureza. Segundo Santos e Sales (2007), o projetista de ferramentas deve-se atentar as propriedades necessárias e mais importantes de acordo com o tipo de aplicação.

2.3.1 Metal Duro

Obtido através do processo de metalurgia do pó, o carboneto de tungstênio denominado como metal duro, desenvolvido originalmente, na Alemanha, continha WC + Co e se apresentou muito eficiente na usinagem de ferros-fundidos cinzentos, entretanto com baixa resistência ao desgaste de cratera. Sendo assim, os pesquisadores conseguiram descobrir uma maneira de superar essa deficiência, com a adição de carboneto de titânio (TiC), carboneto de tântalo (TaC) e/ou carboneto de nióbio (NbC) a sua composição. O metal duro promoveu o segundo grande impulso, após o aço rápido, na área de materiais para ferramentas de corte. Esse material possui grande aplicabilidade pois consegue combinar tenacidade, resistência mecânica e ao desgaste. (MACHADO *et al.*, 2015). Além disso, as propriedades do substrato de metal duro garantem uma boa resistência ao desgaste e em consequências boa eficiência das ferramentas de corte com e sem revestimento (KLOCKE, 2011).

Os metais duros para corte recebem uma classificação com base na aplicação e em um método de identificação através de cores e símbolos. Essa classificação se dá de acordo com a norma NBR ISO 513:2013. Uma característica importante dos carbonetos metálicos, é o tamanho de grãos das partículas duras (SANTOS e SALES, 2007). De um modo geral, a redução do tamanho do grão nas ferramentas de metal duro e a consequente redução da quantidade de aglomerante melhora o desempenho das ferramentas quanto ao desgaste apresentados por elas (POLLY, 2019). Entretanto, mesmo com essa melhoria, a temperatura na interface cavaco-ferramenta no torneamento de materiais endurecidos geralmente ultrapassa o limite de transição ferrita-austenita do material, e neste nível de temperatura, a dureza das ferramentas de metal-duro é reduzida em quatro vezes, acarretando a atuação severa dos diferentes mecanismos de desgaste. Para minimizar tal problema, faz-se o uso de revestimentos (BOING, 2016).

De acordo com Klocke (2011), atualmente, os revestimentos mais utilizados são o nitreto de titânio (TiN), nitreto de alumínio e titânio (TiAlN), carbo-nitreto de titânio (TiCN) ou óxido de alumínio (Al_2O_3). A deposição dos filmes pode ser efetuada tanto pelo processo de CVD - *Chemical Vapour Deposition* (Deposição química a vapor) ou PVD - *Physical Vapour Deposition* (Deposição física a vapor). Segundo Kumar e Patel (2018), a espessura, a quantidade de camadas e a técnica utilizada para a deposição do revestimento impactam nitidamente no desempenho da ferramenta de corte.

2.3.2 Cerâmicas

As ferramentas cerâmicas são compostas de materiais metálicos e não metálicos, geralmente em forma de óxidos, nitretos ou até mesmo carbonetos. Sendo assim, essas ferramentas possuem uma elevada dureza à quente, grande resistência ao calor e ao desgaste, além de boa estabilidade química o que faz ser indicada para a usinagem de materiais endurecidos. (WANG *et al.*, 2017; AOUICI *et al.*, 2016).

As ferramentas cerâmicas são divididas em dois grupos em função do material empregado como matriz: cerâmicas a base de alumina (Al_2O_3) e cerâmicas a base de nitreto de silício (Si_3N_4). As cerâmicas à base de Al_2O_3 têm alta dureza, boa resistência ao desgaste e estabilidade química, mas baixa tenacidade. São utilizadas na usinagem em aços endurecidos e para materiais fundidos. Comparado com alumina, a Si_3N_4 tem menor dureza, mas maior tenacidade. Elas são usadas para usinagem de ligas de níquel e ferro fundido, mas devido a uma grande interação química com o ferro em alta temperatura geralmente não são utilizadas na usinagem de aços (MACHADO *et al.*, 2015). Grande receptividade recebida pelo mercado, desde a década de 1980, são as cerâmicas reforçadas com SiC -*whiskers*, também a base de alumina, possuindo dureza intermediária comparada as outras, porém maior tenacidade e resistência ao choque. (SMITH, G,T, 2008).

Autores como Aslantas *et al.*, (2012), afirmam que uma grande vantagem da utilização de cerâmicas na usinagem de materiais endurecidos, se dá devido ao seu custo. Por exemplo, ferramentas de diamante embora possuam dureza maior, não são indicadas na usinagem de materiais ferrosos devido a afinidade química, onde através do processo de aumento de temperatura de corte ativa o processo de deterioração causando a grafitização. Tais ferramentas, são amplamente aplicáveis na usinagem de compostos não ferrosos e não metálicos.

2.3.3 Nitreto Cúbico de Boro

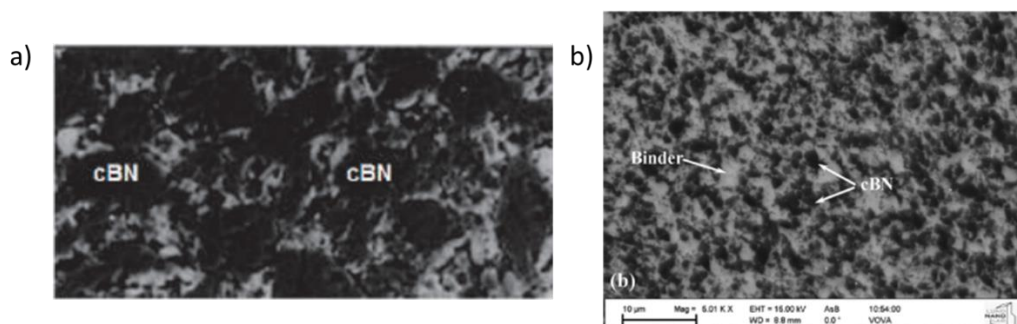
As ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN) e nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) obtidas também via metalurgia do pó, tem se apresentado como uma boa alternativa na usinagem de aços endurecidos, além de ligas de níquel e ferros fundidos. Isso se dá, pois essas ferramentas são termicamente estáveis até uma temperatura de 1200 °C e possuem uma resistência ao ataque químico maior se comparado ao diamante. Desta maneira, pode ser empregado em qualquer material, apesar de alguns desses, não ser vantajoso no ponto de vista econômico. (MACHADO *et al.*, 2015). Embora as ferramentas de CBN e PCBN sejam de custo mais elevado, são muito utilizadas em usinagens de materiais endurecidos acima de 60 HRC (KUMAR e PATEL, 2018).

O Nitreto Cúbico de Boro é o material para ferramentas de corte mais duro depois do diamante. Foi sintetizado pela primeira vez com sucesso, em 1957 pela General Electric Co. United States, que estabeleceu o nome Borazon como marca registrada para seu produto. Logo depois, a De Beers lançou o Amber Boron Nitride (Amborite), como seu produto. (ABRÃO; 1995; SOUZA JÚNIOR, 2001 *apud* CORRÊA, 2002). O PCBN pertence ao grupo de materiais ultraduros e tem dureza superior a 3000 HV. Os materiais considerados ultraduros de ferramentas de corte são:

- a) Diamante Natural;
- b) Diamante Sintético Monocristalino (dureza acima de 6000 HV);
- c) Diamante Sintético Policristalino - (PCD);
- d) Nitreto Cúbico de Boro Sintético Monocristalino (CBN);
- e) Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN).

As principais características das ferramentas de CBN (nitreto cúbico de boro) e PCBN (nitreto cúbico de boro policristalino), podem ser descritas como boa resistência ao desgaste, dureza a quente e resistência a oxidação maiores em comparação as cerâmicas; além de possuir melhor vida das ferramentas. (SOBIYI *et al.*, 2015). Para melhor compreensão e estudo elas podem ser classificadas com alto teor de CBN (aproximadamente 90% em massa) e baixo teor (aproximadamente 60% em massa). São constituídas em grãos micrométricos de CBN dispersos em uma matriz composta de carbonetos metálicos, óxidos e nitretos (GRZESIK, W., 2018). O elevado teor de CBN influencia no aumento da dureza e a tenacidade, acarretando tendência maior de difusão, em função da fase metálica utilizada como aglomerante, se comparado às de baixo teor. Fato se dá, como ferramentas indicadas na usinagem de cortes interrompidos, onde sofre cíclicos choques mecânicos. Já nas ferramentas de baixo teor de CBN, é reduzido a dureza e tenacidade o que promove uma maior tendência aos microlascamentos. Essas características vêm da adição da fase cerâmica, que proporciona uma maior estabilidade química e são indicadas para os cortes contínuos (KLOCKE, F.; KÖNIG, W, 2008). Na Figura 8 são apresentadas diferentes micrografias de ferramentas de PCBN de baixo e alto teor de CBN.

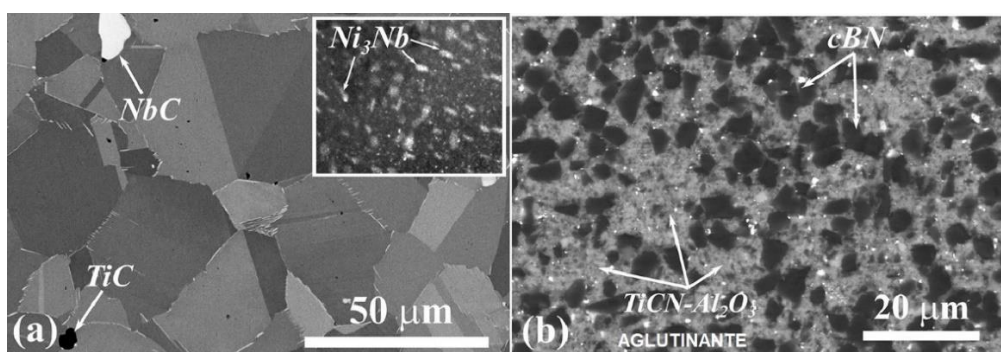
Figura 8 – Micrografia das Ferramentas de PCBN – a) Baixo Teor de CBN e b) Alto Teor de CBN



Fonte: a) Adaptado de BUSHLYA, V. *et al.*, (2013) e b) Adaptado de GRZESIK, W. (2018)

Nos estudos de Volodymyr Bushlya *et al.*, (2021), foram investigados os desgastes e mecanismos de uma ferramenta de PCBN na usinagem de uma liga de Inconel 718 em vários comprimentos, com dureza aproximada de 45 HRC. Os ensaios foram realizados com os parâmetros de corte ($f = 0,15$ mm/rev; $a_p = 0,25$ mm e velocidade de corte variável entre 200 m/min e 450 m/min). Nos testes foi utilizado uma ferramenta com baixo teor de CBN, cerca de 75% e ligante cerâmico reforçado com SiC-whiskers. O ligante composto por carbonitreto de titânio (TiCN) e uma pequena fração de Al_2O_3 . Os resultados indicaram que a dissolução por difusão de CBN com difusão externa de boro e nitrogênio é um mecanismo de desgaste bastante presente e as altas velocidades de corte fazem com que a oxidação do CBN torne-se um mecanismo importante. Além disso, em relação a difusão do CBN e do aglutinante, o último como um todo foi menos propenso. Por fim, os autores afirmam que o desgaste adesivo é ativo na região do flanco da ferramenta, resultado em remoção microscópica de CBN e do ligante, como esperado. Na Figura 9 é apresentada a microestrutura da liga de Inconel 718 e da ferramenta de CBN.

Figura 9 - Microestruturas a) *Inconel* 718 e b) CBN



Fonte: VOLODYMYR BUSHLYA *et al.*, (2021)

Em outro estudo os autores Slipchenko *et al.*, (2022), investigaram novos ligantes para ferramentas de corte baseadas em CBN. Ligantes conhecidos (TiC, TiN, Ti(C,N)) e candidatos a ligantes incomuns, como ZrN, VN e HfN foram utilizados para a usinagem do também Inconel 718 e do aço inoxidável AISI 316L. Como uma das principais conclusões do trabalho, é afirmado que o desempenho das ferramentas com ligante TiC-ZrN é até 20% melhor do que o das ferramentas de referência com ligante TiC na usinagem da superliga Inconel 718. Ao usinar o aço AISI 316L, as ferramentas com ligantes TiC-ZrN e TiC-VN têm 80–90 % melhor desempenho do que ferramentas de referência com ligante TiC. Por fim, Henrik *et al.*, (2021), investigaram a usinabilidade também do aço inoxidável AISI 316L, em condições de altas velocidades abrangendo três graus de PCBN com diferentes conteúdos de CBN variando de 50 a 90%. A classe PCBN com 65% de CBN demonstrou o melhor desempenho. A classe com esse percentual apresentou a maior vida útil da ferramenta, atribuída a uma combinação de alta tenacidade à fratura e formação estável de uma camada protetora da ferramenta na superfície da cratera, sendo este o desgaste mais presente. Outra conclusão importante, foi que o desempenho do grau de CBN de 50% em volume foi fortemente afetado por sua tenacidade à fratura relativamente baixa, medida como sendo 40% menor do que os graus de teor mais alto de CBN. Combinado com uma condutividade térmica 20% menor, isso resultou em desgaste acelerado e maior probabilidade de quebra da ferramenta.

2.4 Desgaste das Ferramentas de Corte

As análises das ferramentas de corte compõem uma das partes mais importantes dos trabalhos que envolvem o torneamento de aços endurecidos. Os fatores como produtividade, aumento dos tempos de usinagem são dependentes dos desgastes de ferramentas. De acordo com norma NBR ISO 3685:2017 (ensaio da vida da ferramenta de ponta única para torneamento), ela define que o desgaste da ferramenta é uma alteração na forma original da ferramenta, que vai causar perda progressiva tanto do material da ferramenta ou até mesmo deformação. Muitos autores utilizam parâmetros e materiais que lhes são convenientes para alcançar determinados resultados, embora a norma recomende parâmetros gerais, existe a indicação de materiais como aços e ferros fundidos, mas deixa claro que, as instituições de ensaios estão livres para selecionar os materiais de acordo com os próprios interesses.

Existem três fatores que são causadores de mudança da geometria da aresta de corte, que resulta em perda gradual, ou deslocamento de material (MACHADO *et al.*, 2015). Esses fatores são classificados pelo autor como avaria, desgaste e deformação plástica. Uma diferença básica entre os processos, afirma Trent e Wright, (2000), que o desgaste envolve

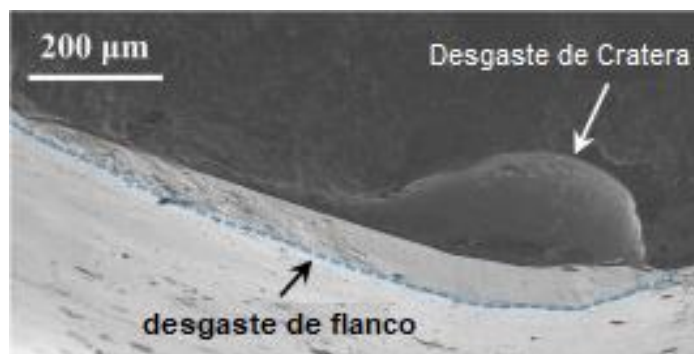
sempre alguma perda de material vindo da superfície da ferramenta. As definições desses termos, são descritas a seguir.

- Avaria: Fenômeno de deterioração da ferramenta de corte em que ocorre repentinamente e inesperado, causado por trincas da aresta de corte, lascamento ou quebra, e tem como fim a quebra da ferramenta e frequentemente são detectadas somente após o ocorrido. (MACHADO *et al.*, 2015);
- Desgaste: Mudança da sua forma original, durante o corte, o que resulta na perda gradual de material da ferramenta ou deformação (NBR ISO 3685, 2017). Hutchings e Shipway, (2017) classificam como deterioração de uma ou ambas as superfícies que fazem parte de um sistema tribológico, em que geralmente há perda progressiva de material.
- Deformação Plástica: Mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material devido a altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte somadas a altas temperaturas. É valido lembrar, que alguns autores (TRENT e WRIGTH, 2000) consideram a deformação plástica como um mecanismo de desgaste (MACHADO *et al.*, 2015).

A norma NBR ISO 3685:2017, identifica e determina os critérios para quantificar esses desgastes. Os principais são:

- Desgaste de Cratera: localizado na superfície de saída da ferramenta. Este tipo de desgaste geralmente está ligado às elevadas temperaturas combinados ao fluxo de material que desliza sobre a ferramenta formando uma cratera que é de onde deriva o nome (TRENT e WRIGHT, 2000). O principal mecanismo de desgaste (será abordado com mais detalhes no próximo item) responsável pelo desgaste de cratera é a difusão (MACHADO e DINIZ, 2017).
- Desgaste de Flanco: localizado nas superfícies principal de folga e na lateral de folga, passando pelo raio de ponta. O desgaste de flanco é o fenômeno mais comum de se observar, e inevitável no corte de metais. (SIDDHPURA e PAUROBALLY, 2013). De acordo com Machado *et al.*, (2015), os mecanismos de abrasão e adesão são predominantes nesse tipo de desgaste. Na Figura 10, são apresentados os dois tipos de desgaste: cratera e flanco.

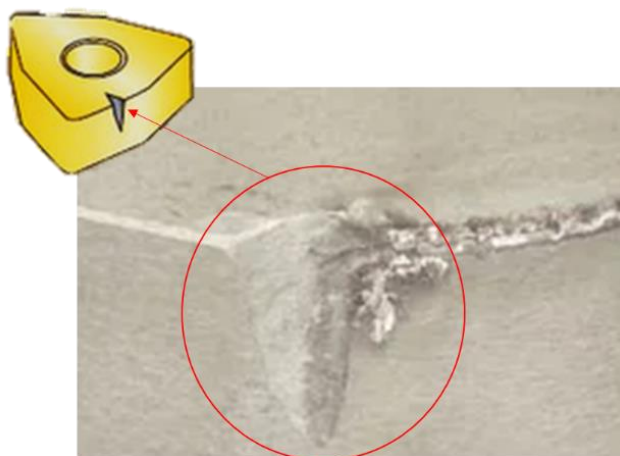
Figura 10 - Desgaste de Flanco e Cratera na Usinagem de um Aço Rolamento AISI 52100



Fonte: HÜSEYİN, A. Ç.; ADEM, Ç.; NECATİ, U., (2020)

- Desgaste de Entalhe: localizado também, assim como o desgaste de flanco, na superfície principal de folga da ferramenta e é formado pela passagem de material do cavaco pela lateral da borda da peça. (KLOCKE, 2011). Os principais mecanismos que promovem o desgaste de flanco são: abrasão, adesão, fadiga e trincas. Na Figura 11 é apresentada a localização do desgaste de flanco na ferramenta.

Figura 11 - Desgaste de Entalhe



Fonte: Adaptado de sandvik.coromant.com, (2022)

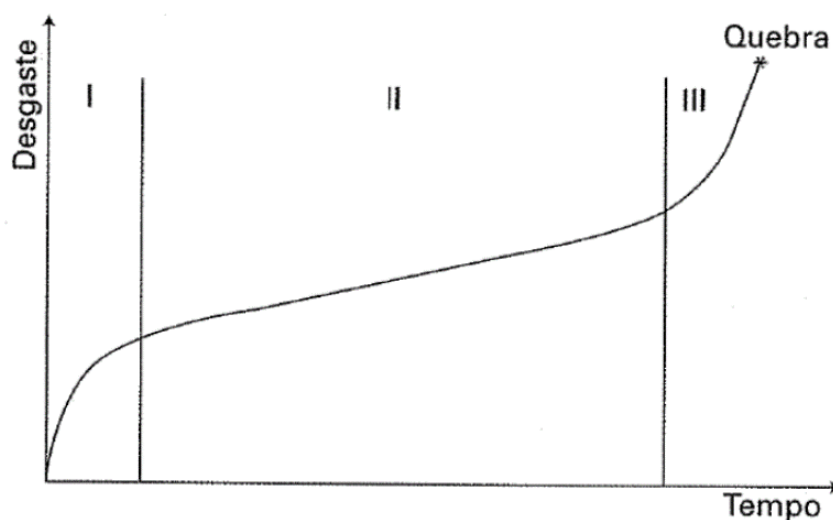
De acordo com Machado *et al.*, (2015) na usinagem, de um modo geral, as arestas de corte se desgastam seguindo uma curva-padrão (Figura 12). Na evolução do desgaste, os autores distinguiram em três estágios:

- Estágio I: ocorre nos primeiros instantes de corte, onde a ferramenta sofre de maneira acelerada um desgaste de adequação ao sistema tribológico envolvido, com posterior acomodação da cunha cortante e desaceleração do desgaste.

- Estágio II: a ferramenta nessa etapa está totalmente adequada ao processo, caracterizada por um desgaste constante ao longo do tempo.
- Estágio III: neste momento acontece o início de uma aceleração em relação ao aumento da taxa de desgaste, culminando em um curto espaço de tempo, a quebra da ferramenta, devido a altas tensões e temperaturas.

Deve-se, portanto, observar atentamente a evolução da curva para que não atinja o estágio III, pois logo a ferramenta irá quebrar, tornando-se muito difícil de evitar.

Figura 12 - Curva do Comportamento do Desgaste da Ferramenta em Função do Tempo



Fonte: (MACHADO, *et al.*, 2015, p. 278).

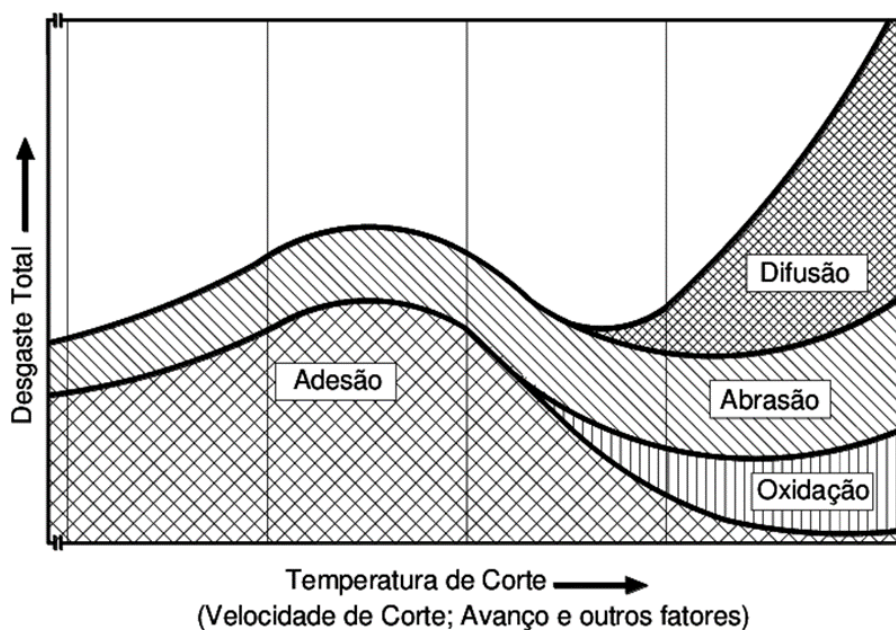
De acordo com Bouacha *et al.*, (2014), cada deterioração experimentada por uma ferramenta de corte com geometria definida é resultado da combinação dos impactos do desgaste de flanco, cratera e deformação plástica. Quando a profundidade de corte é reduzida, como no caso do processo de torneamento duro, os efeitos mais evidentes são o desgaste de flanco e a formação de crateras, além da presença de entalhes nas extremidades da zona de corte. A avaliação do desgaste de flanco e da formação de crateras é crucial para entender o impacto das variáveis experimentais.

2.5 Mecanismo de Desgaste

Os mecanismos de desgaste citado anteriormente, são responsáveis por produzir tais desgastes e depende de uma série de fatores como geometria da ferramenta, dos materiais do par peça/ferramenta e das condições de corte (STEPHENSON, 2016). Esses mecanismos

podem ser classificados, são eles: difusão, abrasão, adesão e oxidação. (MACHADO *et al.*, 2015). Na Figura 13 é apresentado um diagrama conhecido na literatura disponível, para ilustrar esses mecanismos de desgaste em relação a temperatura.

Figura 13 - Diagrama dos Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Corte em Função da Temperatura



Fonte: (VIEREGGE, 1970 *apud* KÖNIG & KLOCKE, 1997, *apud* MACHADO *et al.*, 2015, p.281)

O desgaste por difusão ocorre pela migração de átomos de um material para outro, ocasionando alterações. Esse fenômeno é ativado termicamente, afinidade química e tempo de contato. Pode ocorrer tanto na superfície de saída da ferramenta com na superfície de folga, como já citado, é o principal mecanismo para a formação do desgaste de cratera.

A abrasão ocorre quando o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras que podem estar soltas entre duas superfícies com o movimento relativo, ou é de origem de uma delas. Quando essas partículas se desprendem, existe um terceiro material entre as superfícies e o desgaste irá ocorrer com a presença dessas partículas soltas, ocasionando o desgaste conhecido como “três corpos” (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

O desgaste de adesão, ou conhecido na literatura como *attrition*, (TRENT e WRIGHT, 2000) é caracterizado por ocorrência em baixas velocidades de corte, na qual ocorre uma transferência de material, de uma superfície para outra durante o movimento relativo,

formando junções soldadas de partículas da peça sobre a superfície da ferramenta. Esta estrutura rompe levando consigo pequenos materiais da superfície da ferramenta. Esse fenômeno está presente na formação da aresta postiça de corte. Alguns fatores podem ajudar a impedir esse desgaste como utilização adequada do fluido de corte, recobrimento de ferramentas com materiais de baixo coeficiente de atrito. (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014).

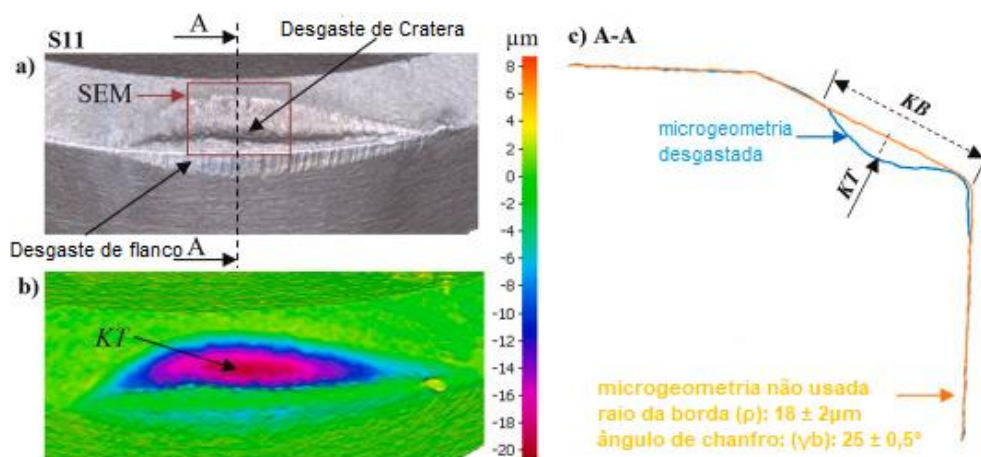
A oxidação se dá pela formação de um filme de óxido devido a altas temperaturas e na presença de elementos oxidantes. Esses óxidos geralmente porosos, são formados na superfície da ferramenta de corte, que são levados facilmente pelo atrito. Tem influência muito grande na formação do desgaste de entalhe (MACHADO, *et al.*, 2015; DINIZ *et al.*, 2014).

2.6 Critério de Fim de Vida da Ferramenta

As ferramentas de corte possuem critérios de fim de vida e a maneira mais usual de determinar é através da norma NBR ISO 3685:2017, que tem como objetivo determinar o tempo de corte necessário para atingir um critério de vida. Esse critério é um valor limite baseado em uma medida de desgaste da ferramenta ou quando ocorre um fenômeno, como a quebra ou deformação plástica. Conforme orientação da norma, é possível quantificar esses desgastes e são medidos no plano ortogonal da ferramenta na superfície de folga e saída, conforme apresentado na Figura 14. No flanco são medidos a largura da impressão de desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de flanco máximo ($VB_{B_{máx}}$), e do desgaste de entalhe (VB_N) na aresta principal e secundária (VB_C). Na superfície de saída são medidas: a profundidade de cratera (KT), a largura da cratera (KB), a distância do centro da cratera a aresta de corte (KM) e a distância frontal entre o desgaste de cratera e flanco (KF).

m/min, avanço (f) = 0,15 mm/rev, profundidade de corte (a_p) = 0,1 mm, não houve o uso de lubrificantes. Os autores observaram que, o principal desgaste ocorrido nas ferramentas foi o desgaste de cratera, que tornaram a aresta de corte mais propensa a fraturas frágeis. Na Figura 15 são apresentados os desgastes ocorridos com os experimentos.

Figura 15 - Desgaste Ocorrido nas Ferramentas de PCBN no Torneamento de um Aço Cementado

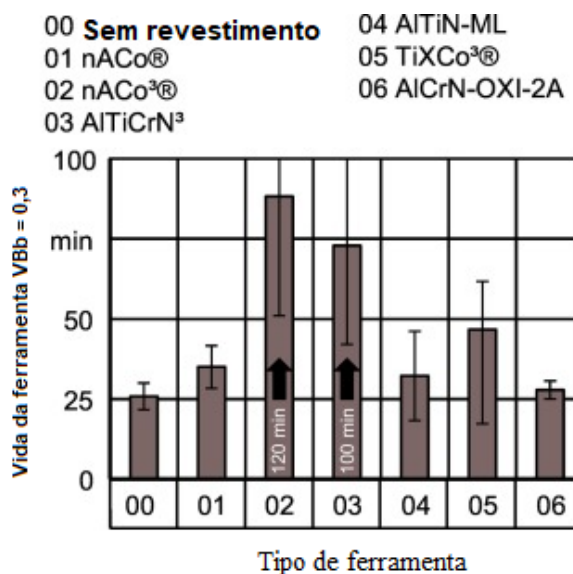


Fonte: BOING *et al.*, (2021)

No trabalho de Uhlmann *et al.*, (2018), foi analisado a resistência ao desgaste de ferramentas de PCBN revestidas com PVD (deposição física de vapor) e não revestidas, para torneamento de aços endurecidos, com intuito principalmente de verificar uma redução do desgaste e consequentemente aumento da vida útil da ferramenta. De acordo com a pesquisa, revestimentos desse tipo promovem um aumento da resistência ao desgaste. Foram realizados testes, avaliações tribológicas e simulação numérica.

Nos ensaios que foram feitos, os parâmetros utilizados foram velocidade de corte (v_c) = 100 m/min, avanço (f) = 0,08 mm/rev, e profundidade de corte (a_p) = 0,25 mm. O material ensaiado foi o aço AISI 52100 frequentemente utilizado como aço para rolamentos, com dureza de 60 ± 2 HRC. Na determinação do desgaste os autores mediram o desgaste de flanco (VB) e a profundidade de cratera (KT). Para caracterizar o desgaste de flanco máximo usou-se $VB_{\text{máx}} = 0,3$ mm. Na Figura 16 é possível observar os resultados da vida útil das ferramentas de PCBN revestidas e não revestidas.

Figura 16 – Tempo de Vida das Ferramentas com e sem Revestimentos – $VB_{B\max} = 0,3\text{mm}$



Fonte: UHLMANN *et al.*, (2018)

De acordo com o estudo, os melhores resultados podem ser observados nos revestimentos 02 e 03 apresentando as maiores vida útil entre as ferramentas estudadas. Isso porque, em velocidades de corte comparativamente baixa, a temperatura tem influência significativa menor e o desgaste abrasivo é prioritário, tendo em vista esses revestimentos que obtiveram os melhores resultados são caracterizados por uma alta dureza e resistência a abrasão.

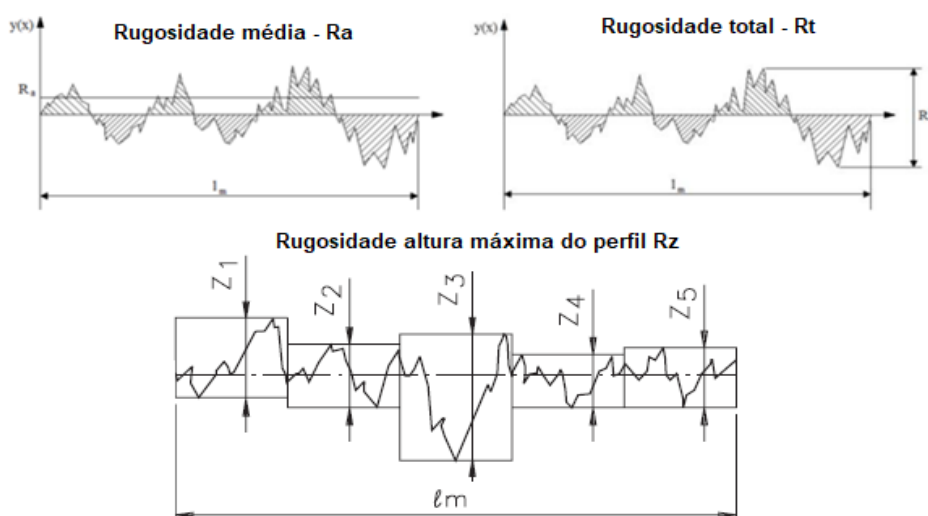
2.7 Integridade Superficial

A integridade superficial tornou-se muito importante no estudo em que envolvem processos de fabricação de usinagem. Caracterizar a superfície usinada, traz informações importantes das condições de corte que foram executadas em cada ensaio, bem como o desempenho funcional de um componente mecânico é influenciado pela qualidade e a credibilidade produzida pelo processo de fabricação. O termo integridade superficial no sentido da engenharia engloba um conjunto de propriedades da camada superficial e subsuperficial da peça que afetam seu desempenho. A avaliação da integridade possui parâmetros e podem ser classificados em geométricos (textura), físicos (microdureza, tensões residuais, microestrutura), químicos (reações químicas superficiais) (ASTAKHOV e DAVIM, 2010).

De acordo com Hutchings e Shipway (2017), a rugosidade consiste em imperfeições micro geométricas oriundas do processo de fabricação, como por exemplo o torneamento. Têm influencia diretamente na vida em fadiga, na resistência ao desgaste, no coeficiente de atrito, e na confiabilidade do produto. Sendo assim, é considerada como uma das principais características de um produto (RATNAM, 2017). De acordo com Ferreira *et al.*, (2016), a rugosidade obtida nos processos de usinagem, é geralmente utilizada como um critério para avaliar a qualidade do produto acabado.

A rugosidade é afetada por uma série de variáveis que podem ser agrupados quanto a sua funcionalidade e recebem uma classificação em parâmetros de amplitude, parâmetros de espaço e parâmetros híbridos, segundo os estudos de Gadelmawla *et al.*, (2002). É afirmado ainda que, os parâmetros de amplitude são os mais utilizados para caracterização topográfica dos materiais. A norma NBR ISO 4287:2002 estabelece e especifica termos, definições e parâmetros para a determinação do estado de superfície pelo método do levantamento de perfil. Dentre vários parâmetros que são possíveis de se obter, o mais conhecido e utilizado na indústria é o parâmetro universal R_a (rugosidade média), que é definido como desvio médio absoluto da rugosidade a partir da linha média sobre um comprimento de amostragem “*cut-off*”. Além do parâmetro R_a , o parâmetro R_t (rugosidade total), também é muito utilizado na indústria metal mecânica, pois este parâmetro tem alta sensibilidade aos elevados picos ou profundos arranhões (SOUZA, 2020). Corresponde distância vertical máxima entre o pico mais elevado e o vale mais profundo no comprimento de amostragem. Outro parâmetro avaliado é a altura máxima do perfil (R_z) que relaciona a amplitude do perfil de rugosidade considerando a média dos cinco pontos mais altos e mais baixos, antes de efetuar a diferença entre eles (PARRA *et al.*, 2016). Os três parâmetros citados são mostrados na Figura 17.

Figura 17 - Representação Gráfica dos Parâmetros de Medição R_a , R_t e R_z



Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 4287 (2002)

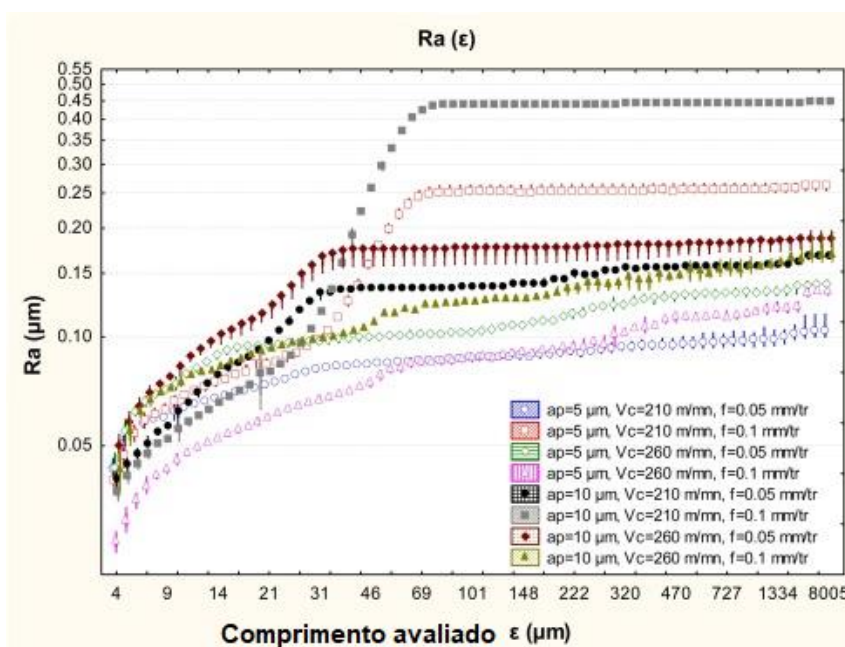
No estudo de Yasuo Yamane *et al.*, (2017), é realizado um estudo da integridade da superfície, mais especificadamente uma análise quantitativa da rugosidade da superfície usinada por torneamento, comparando uma rugosidade superficial real e um perfil ideal. O método consiste em estimar a correta posição da aresta de corte ou a posição central do raio da aresta, considerando que as instabilidades da usinagem e do processo de corte podem ser obtidas quantitativamente. Desta maneira, através da estimativa da localização ideal da ponta e o desvio em relação a posição real da ferramenta na peça, é possível gerar dados que relacionam diretamente com a qualidade da superfície usinada. Os ensaios ocorreram com três diferentes testes. No experimento 1, o corpo de prova era um aço inoxidável AISI 440C as ferramentas eram revestidas com TiAlN. Nos experimentos 2 e 3 foram utilizados o aço inox AISI 304, mesmas ferramentas de metal duro ISO12 04 08 - P10 e todas os experimentos a usinagem ocorreu a seco. Os autores afirmam que, após os ensaios é possível avaliar quantitativamente a instabilidade dos fenômenos de corte como o desgaste por adesão ou aresta postiça de corte, onde a diferença entre o perfil de rugosidade da superfície usinada e a geometria da aresta de corte da ferramenta reflete a estabilidade do processo de corte.

Ao usinar um aço de rolamento EM 31 endurecido, com ferramentas de CBN sob condições de usinagem a seco, Karthik *et al.*, (2020), obtiveram parâmetros de corte ideais a fim de minimizar a rugosidade da superfície. Variando-se em três níveis os parâmetros de corte de entrada como velocidade de corte (100, 200 e 300 m/min), avanço (0,04; 0,08 e 0,12 mm/rev) e profundidade de corte (0,1; 0,2 e 0,3 mm) com o uso do método de matriz ortogonal Taguchi L9 conseguiram estabelecer os melhores parâmetros de corte para atingir a

rugosidade superficial mínima. Após os ensaios experimentais, os autores concluíram que a partir dos resultados a rugosidade da superfície aumentou com o aumento do avanço para os todas as velocidades de corte, afirmando que o avanço é o parâmetro mais influente e dominante para a melhoria da rugosidade superficial. Por fim, comparou-se o material de rolamento torneado com esse mesmo material usinado com o processo de retificação e constataram que a rugosidade da superfície é mínima, indo de encontro com as afirmações de Boing *et al.*, (2018) sobre o processo de torneamento de aços endurecidos tem substituído os processos de retificação.

A integridade da superfície usinada tem influência, por exemplo, na vida útil à fadiga em materiais duros como os anéis de rolamento. No estudo de NABIL, J; PHILIPPE, R.; GUILLAUME, T., (2020), foram avaliados corpos de prova de aço AISI 52100 acabados por torneamento e retificação. Eles analisaram as amostras e concluíram que no torneamento tem vida útil a fadiga quatro vezes maior do que os materiais que foram usinados por retificação. Além do mais, o torneamento atingiu rugosidades média $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ com seleção adequada de parâmetros de corte. Na Figura 18 é mostrada a evolução da rugosidade média R_a em função do comprimento de avaliação.

Figura 18 – Rugosidade Média R_a em Função do Comprimento de Avaliação

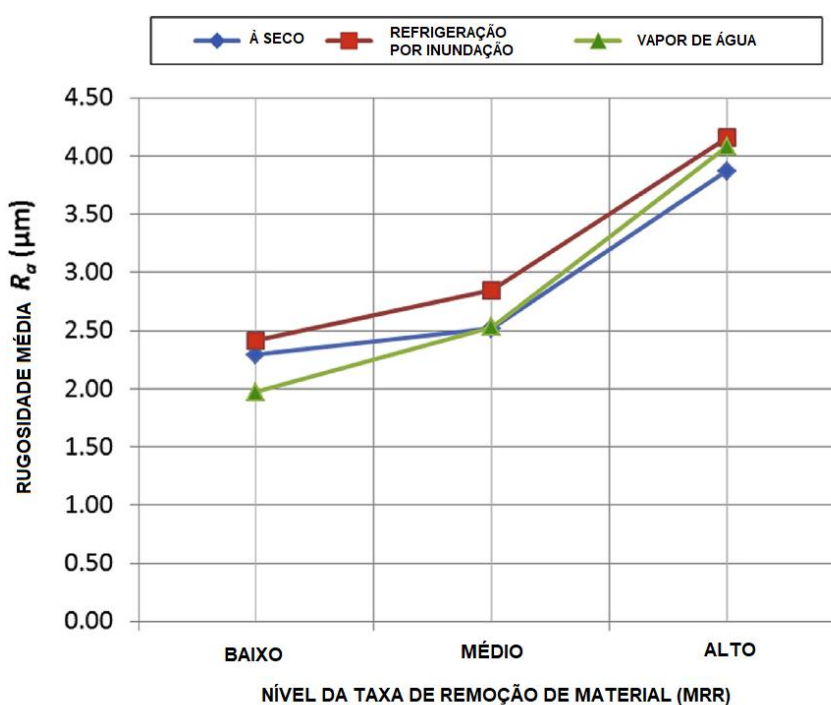


Fonte: NABIL, J; PHILIPPE, R.; GUILLAUME, T., (2020)

Tensões residuais oriundas dos dois processos de fabricação também foram avaliadas nesse trabalho, a fim de investigar os efeitos na superfície dos materiais usinados. Elas foram medidas por difração de raios-X usando um sistema robótico na profundidade e na superfície.

A avaliação da integridade da superfície também foi estudada pelos autores Kadam, G. S. e Pawade, R. S., (2017), no torneamento de alta velocidade de uma liga de Inconel 718. Níveis variados de taxas de remoção de material foram avaliados usinando em três condições: a seco, refrigeração por inundação e uso de vapor de água. Além disso, foi proposto variar todas as variáveis de entrada, como a velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p). A rugosidade da superfície foi medida ao longo da direção longitudinal em seis locais na superfície da amostra e o parâmetro R_a foi tomado como o valor de resposta final. Na Figura 19, são apresentados como os efeitos dos parâmetros de corte têm influência na taxa de remoção de material (MRR), que é a quantidade de material removido por unidade de tempo, visando diretamente a produtividade do processo (JAHAN, RAHMAN e WONG, 2014).

Figura 19 - Rugosidade Média R_a e a Variação da MRR



Fonte: (KADAM, G. S.; PAWADE, R. S., 2017)

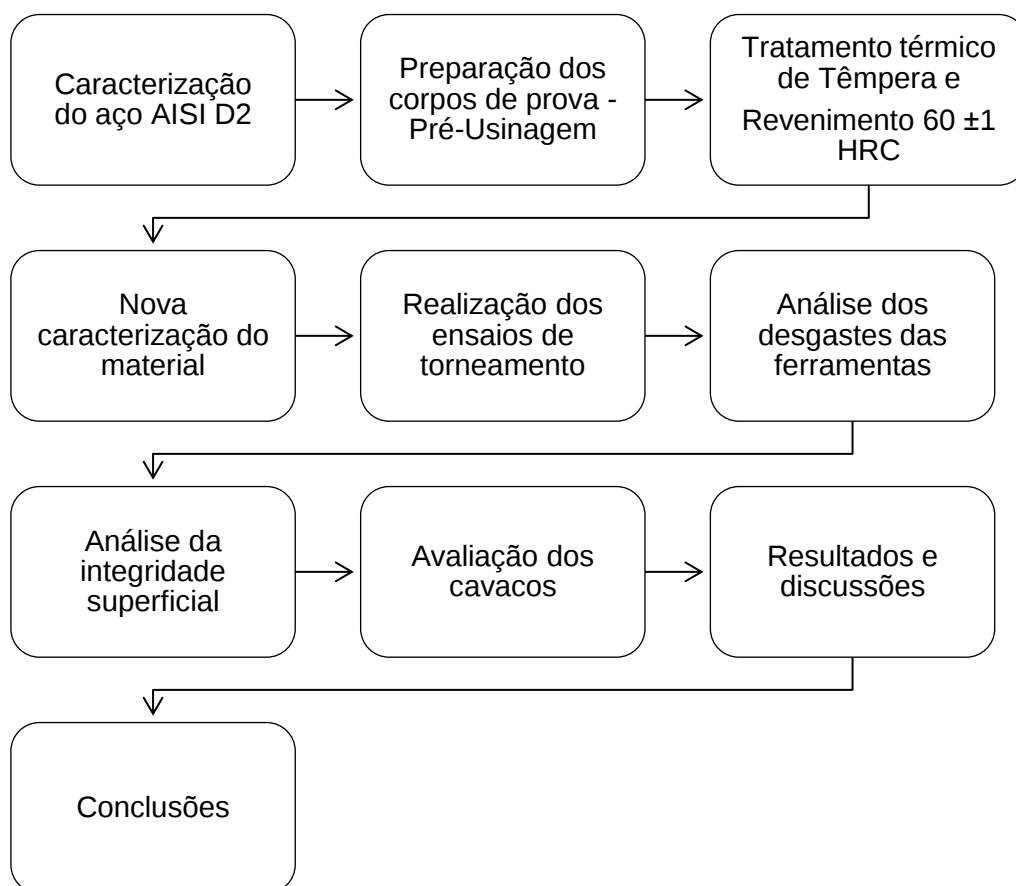
Os autores concluíram que a usinagem utilizando vapor de água como refrigerante e lubrificante tem bons resultados apenas em baixas taxas de remoção de material, pois em velocidades de corte mais altas o vapor de água é incapaz de penetrar adequadamente na interface ferramenta e cavaco. Para alta MRR, o recomendado é o uso de corte a seco pois garantem bons resultados, além de ser a melhor opção do ponto de vista da sustentabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para descrever os detalhes dos procedimentos que foram adotados, esse capítulo especifica as características da máquina-ferramenta, do corpo de prova e sua geometria, a ferramenta e o porta-ferramentas, a caracterização do material, bem como o método de análises dos desgastes das ferramentas.

A seguir é apresentado na Figura 20 um fluxograma dos procedimentos experimentais que foram realizados.

Figura 20 - Fluxograma da Metodologia de Trabalho



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.1 Equipamentos e Materiais

Os experimentos dessa pesquisa foram realizados na oficina de usinagem mecânica do SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - unidade Euvaldo Lodi, localizado na cidade de Contagem e nas dependências do SENAI CETEF - Centro Tecnológico de Fundação Marcelino Corradi, na cidade de Itaúna. As análises das ferramentas e dos materiais foram feitas no laboratório de ensaios e análises em materiais (LAMAT) pertencentes ao SENAI CETEF.

3.1.1 Máquina-Ferramenta

A máquina que foi utilizada é um torno CNC marca Nardini modelo Logic VS I. O equipamento possui potência nominal disponível 7,5 kW, rotação máxima de 3500 RPM distância entre pontas de 1000 mm, diâmetro máximo de 440mm, torre traseira com 8 posições e avanço rápido em X e Z é de 15 m/min e placa com acionamento pneumático com 8 bar de pressão. O comando numérico é composto por sistema FANUC-OI. A máquina se encontra no SENAI CETEF em Itaúna. Na Figura 21 é apresentado o equipamento.

Figura 21 - Máquina Ferramenta Utilizada nos Experimentos



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.2 Sistema de Fixação

Para a fixação dos corpos de prova na máquina, foi necessário usinar 10 mm nas castanhas, com o objetivo de criar um batente de apoio para facilitar o encaixe correto e ajuste

da profundidade, haja visto que o formato de disco é utilizado na pesquisa em operações de faceamento. Na Figura 22 é mostrado o material fixado na placa.

Figura 22 - Fixação do Corpo de Prova na Placa com Castanhas Usinadas



Fonte: Elaborado pelo autor

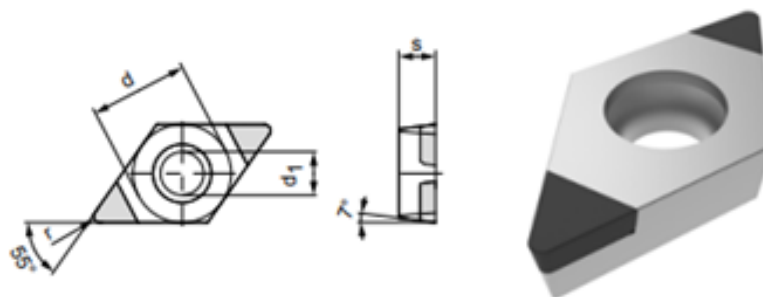
3.1.3 Ferramenta de Corte

Os insertos utilizados nos ensaios foram fornecidos pelo fabricante MAPAL do Brasil com o contato direto com a fábrica no país. Foram fornecidos inicialmente 2 insertos com geometria ISO DCGW 11T304S14N-OAB-PCBN com baixos teores de CBN, para a realização dos pré-teste e ensaios iniciais. Com intuito de agregar e apoiar ainda mais a pesquisa, além de ter insertos suficientes para os testes, a fábrica sugeriu utilizar a matéria prima de PCBN fixados (brasagem) em insertos de metal duro, com a afiação no mesmo código ISO mencionado respeitando os mesmos critérios e tolerâncias dimensionais exigidos. A matéria prima de CBN utilizada foi desenvolvido pela *Diamond Innovations* da classe compacto de BZN 9000. Possui considerável volume em porcentagem de CBN, cerca de 75% de volume na matriz com base de Titânio (Ti). Tem tamanho médio de partículas 4 μm . Os dados geométricos podem ser verificados na Figura 23.

Figura 23 - Geometria da Ferramenta Classe BZN9000

DCGW

Inserto intercambiável PcBN, duplo



Especificação	Dimensões construtivas			
	d	s	r	d ₁
DCGW 11T304 ...N-0AB	9,535	3,97	0,4	4,4

Fonte: *Mapal do Brasil*

O suporte porta-ferramentas utilizado foi SDJCL 2020K 11, com ângulo de posição (93°), ângulo de ataque da ferramenta (-3°), ângulo de saída ortogonal (0°), ângulo de inclinação (0°), Ângulo do corpo da ferramenta em relação à máquina (0°), e ângulo do corpo da ferramenta em relação à peça (0°).

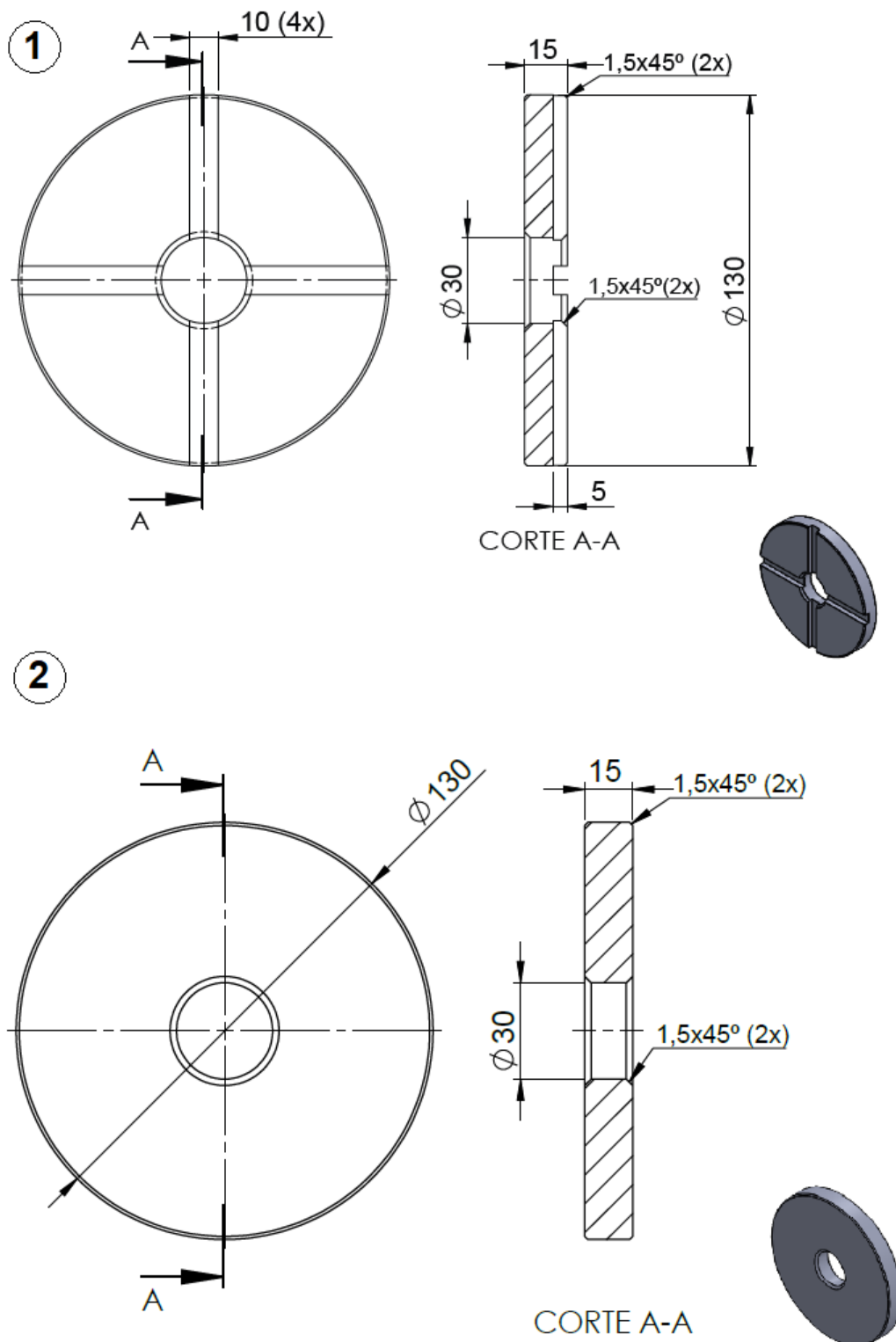
3.1.4 Corpo de Prova

A geometria do corpo de prova, com base nos estudos de Diniz e Oliveira (2008) citado por Boing (2016), tem o formato circular (disco) contendo em seu centro um furo passante. De acordo com os autores, essa geometria induz uma maior rigidez no que diz respeito a usinagem, porque possui pequenos comprimentos em balanço. Outra vantagem, é que dessa maneira com a usinagem de face, pode-se aproveitar um maior volume do corpo de prova, retirando as amostras de uma face e de outra, além de reduzir significativamente qualquer influência da vibração ao processo, pois tal situação pode gerar avarias nas ferramentas ou até mesmo prejuízos no acabamento superficial.

Foram realizados também, chanfros no diâmetro externo ($\varnothing 130$ mm) e no furo ($\varnothing 30$ mm) para minimizar os choques na entrada e saída da ferramenta de corte. Além disso, o furo

central tem a finalidade de garantir que não se atinja valores de rotação acima da capacidade máxima da máquina, logo, a velocidade de corte manteve-se constante. Na Figura 24 são mostradas as dimensões em milímetros (mm) dos corpos de prova para corte interrompido e contínuo.

Figura 24 - Geometria dos Corpos de Prova: 1 Corte Interrompido e 2 Corte Contínuo



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.5 Medição de Dureza

Para realizar a medição da dureza dos corpos de prova, foi utilizado o Durômetro Universal Dura Visio DV30, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração-RBC, seguindo normas e procedimentos adotados pelo laboratório LAMAT. Avaliou-se os corpos de provas antes e após terem recebidos os tratamentos térmicos para fins de comparação.

3.1.6 Rugosidade Superficial

Na avaliação da rugosidade da superfície, foi utilizado um rugosímetro da marca e modelo Mitutoyo SJ-210 (Figura 25) verificado utilizando um padrão de valor conhecido, disponível no SENAI Euvaldo Lodi. Utilizou-se comprimentos de amostragem 0,8 mm e comprimento de avaliação 4 mm. A cada passe realizado, a peça foi avaliada em três pontos distintos, fazendo-se a média dessas medições. Foram medidos os parâmetros de altura total do perfil (R_t), desvio aritmético médio (R_a) e altura máxima do perfil (R_z).

Figura 25 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-210



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.7 Análise Química da Amostra

Uma amostra passou por uma verificação da composição química, utilizando espectrometria de emissão óptica através do espectrômetro SPECTROMAXx, disponível no LAMAT.

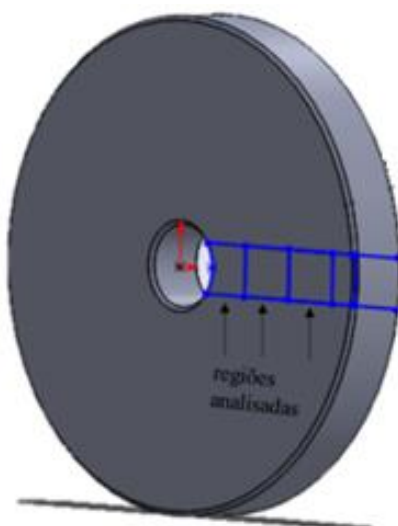
3.1.8 Tratamento Térmico

Para a realização dos tratamentos térmicos dos corpos de prova, a empresa Metaltemper localizada em (Contagem-MG), colocou-se à disposição para apoiar a pesquisa através da sua infraestrutura. Foi realizado a têmpera e revenimento em forno banho de sal com capacidade de Ø770 x 1400 mm, com intuito de atingir a dureza de 60 ± 1 HRC.

3.1.9 Avaliação da Microestrutura

Para avaliação das alterações microestruturais, os corpos de prova foram cortados utilizando o processo de eletroerosão a fio, no equipamento que se encontra disponível na oficina de usinagem do SENAI Euvaldo Lodi. A grande vantagem de se utilizar esse processo, é que não é imposto alterações de origem térmica nas amostras. Foram retiradas com tamanhos de 16 x 16 mm na espessura do corpo de prova, e duas unidades para cada uma das condições sem e com tratamento térmico. Na Figura 26 é ilustrado o procedimento de como foi feita a retirada das amostras dos corpos de prova.

Figura 26 - Região de Retirada das Amostras



Fonte: Elaborado pelo autor

Na sequência, as amostras foram preparadas, embutidas em resina e atacadas com Vilella por aproximadamente 20 segundos. A avaliação foi realizada com auxílio de um Microscópio Ótico GX51 OLYMPUS.

3.1.10 Desgastes das Ferramentas

Nas análises dos desgastes das ferramentas foi utilizado o microscópio digital USB modelo HAIZ – HZ1600x medido passe após passe. Após os ensaios, na avaliação do estado final dos insertos, as amostras foram avaliadas através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca JEOL, modelo JSM-6510 LV localizado também no laboratório LAMAT. As amostras foram ampliadas com foco na região onde ocorreram os desgastes, podendo assim, verificar os mecanismos que atuaram. Além disso, foi realizado análises de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) para avaliação química do estado final das ferramentas na região onde ocorreram os desgastes.

3.2 Metodologia

Inicialmente, os materiais foram recebidos através da empresa parceira LCF Indústria Mecânica, em tarugos de Ø150 x 60 mm, oriundos de uma mesma barra. O primeiro passo realizado foi a pré-usinagem de preparação desses materiais. Foi feita em um torno convencional da marca ROMI modelo T-240, a usinagem dos furos centrais e diâmetros externos. A Figura 27, apresenta o procedimento realizado.

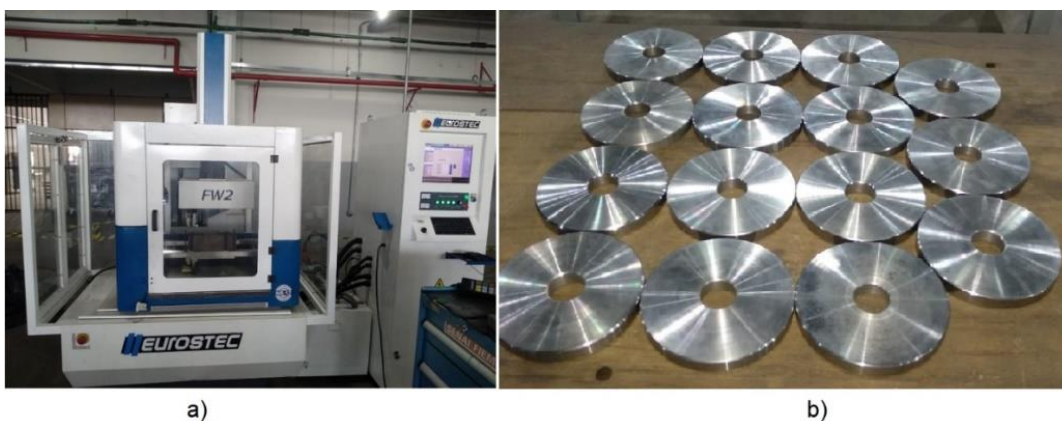
Figura 27 - Preparação dos Corpos de Prova



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em seguida, com auxílio de usinagem por eletroerosão a fio com um equipamento da marca Eurostec de modelo FW2, disponibilizado pelo SENAI Euvaldo Lodi, foram realizados cortes transversais reduzindo-os a espessuras próximas as medidas finais do corpo de prova. Além disso, esse processo não interfere por meio de mecanismos térmicos, nas propriedades mecânicas das amostras, ao contrário de outros processos de usinagem convencional em que introduz tensões de cisalhamento. Sabe-se que, este processo de usinagem demanda um tempo maior que demais processos, entretanto diante da disponibilidade da máquina e facilidade de execução por parte do autor, o equipamento foi escolhido para tal operação. Após esse processo, os discos foram novamente usinados em ambas as faces, para a remoção da camada superficial alterada (camada branca) para posteriores tratamentos térmicos, além dos chanfros e medidas finais. Na Figura 28 é apresentada essa etapa.

Figura 28 - a) Eletroerosão a Fio b) Corpos de Prova Usinados



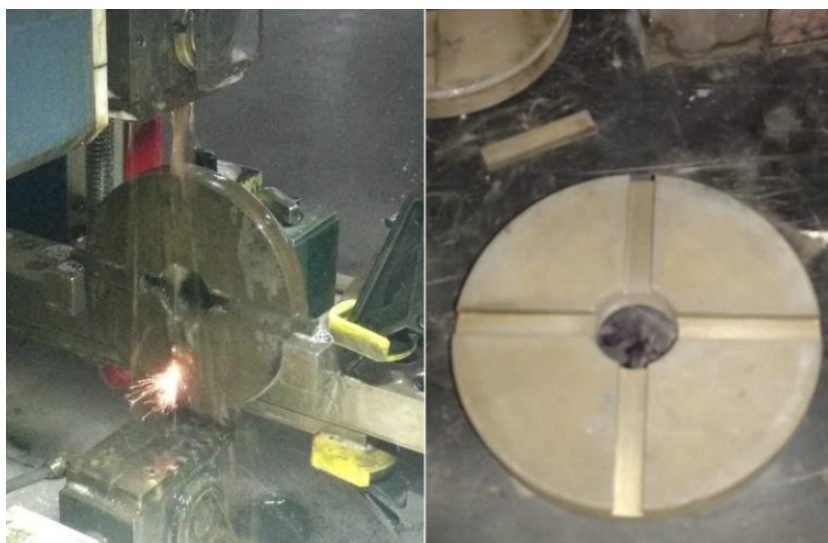
Fonte: Elaborado pelo autor

Uma amostra do aço AISI D2 foi caracterizada de maneira quantitativa através de espectrometria de emissão ótica. Em seguida, outra amostra do material foi submetida a avaliações metalográficas, com auxílio de microscopia óptica evidenciando as microestruturas antes do tratamento térmico. Um ensaio de dureza na escala Rockwell C também foi realizado para fins de comparação posteriormente.

Os corpos de provas após análises iniciais, foram encaminhadas para a realização dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, com objetivo de alcançar durezas de 60 ± 1 HRC. Inicialmente, houve um aquecimento das amostras a $1020\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um tempo de 30 minutos. Em seguida, resfriamento interrompido a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o primeiro revenimento por cerca de 3 horas. Foram realizados também, mais dois revenimentos, ambos a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um tempo de 3 horas.

Depois de tratados os corpos de prova, novas amostras foram retiradas para análises microestruturais e verificação de dureza final. Em função de disponibilidade da empresa parceira e de máquina-ferramenta, a usinagem dos dois rasgos distantes em 90° na face com o objetivo de preparar a geometria para os ensaios de corte interrompido, somente foram feitos após as amostras tratadas. Desta maneira, a usinagem ocorreu novamente com auxílio de eletroerosão a fio, como é apresentado na Figura 29.

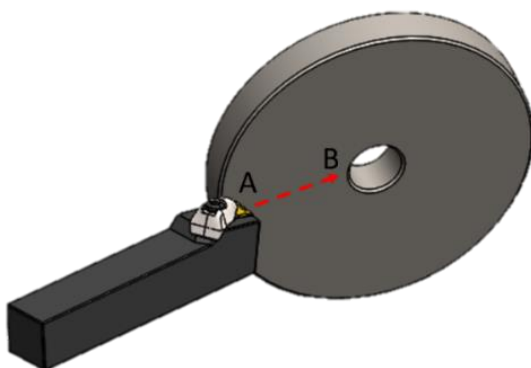
Figura 29 - Usinagem Eletroerosão a Fio em CP (Corte Interrompido)



Fonte: Elaborado pelo autor

Preparados os corpos de provas, iniciou-se os pré-testes de ensaios de usinagem de torneamento externo a seco em sucessivos passes no sentido radial (faceamento A para B), tanto para o corte contínuo como o interrompido. Na Figura 30 são mostrados os detalhes da trajetória da ferramenta.

Figura 30 - Trajetória da Ferramenta no Faceamento de A para B



Fonte: Elaborado pelo autor

Antes do início de cada ensaio, a face foi preparada com uma ferramenta dedicada a essa operação. Esse procedimento tem como objetivo gerar uma superfície de referência minimizando o batimento axial do corpo de prova após ser fixado na máquina. Depois de criada essa superfície de referência, substituiu-se a ferramenta e iniciou os ensaios. Foram realizados 5 passes de 0,2 mm de profundidade de corte (a_p) totalizando 1 mm de material removido para cada faixa de velocidade de corte determinada. Em cada faixa, uma nova ferramenta era selecionada. O avanço foi mantido o mesmo para todos os experimentos $f = 0,15$ mm/rev.

O acabamento superficial da peça usinada foi medido com auxílio de um rugosímetro, realizando-se em 3 pontos distintos, 3 medidas consecutivas nos parâmetros R_a , R_z e R_t e fazendo-se a média destas, como já mencionado anteriormente. Em cada passe, os corpos de provas eram retirados e medidos. Ao retornar à posição de usinagem, toda área de apoio foi limpa e realizado o procedimento descrito no início do parágrafo anterior. Em caso de falha catastrófica ocasionando a quebra da ferramenta e impossibilitando o corte, o ensaio era imediatamente interrompido.

3.2.1 Parâmetros de Corte

Para a realização dos ensaios, foram definidas 3 faixas de velocidade de corte com base nas indicações do fabricante (60,130 e 200 m/min) e 1 acima do recomendado (240 m/min). Para as duas condições de corte (contínuo e interrompido), foram mantidos constantes a profundidade de corte (a_p) e avanço (f). Em todos os ensaios, foi adotado corte à seco. Os valores dos parâmetros de corte utilizados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de Corte dos Procedimentos Experimentais

Parâmetros de Corte	
v_c (m/min)	60
	130
	200
	240
a_p (mm)	0,2
f (mm/rev)	0,15
Condição de corte	Contínuo
	Interrompido

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Matriz de experimentos

Após finalizar a usinagem de cada corpo de prova, ele e a aresta da ferramenta utilizada, foram identificados com uma numeração juntamente com sua velocidade de corte, conforme apresentado na Tabela 3, para análise dos resultados e discussões.

A cada ensaio realizado nas denominadas velocidades de corte, uma réplica foi feita para assegurar a confiabilidade dos resultados.

Tabela 3 - Matriz de Experimentos com Réplica

Amostra	V_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	Condição de Corte
1	60	0,15	0,2	Contínuo
2	60	0,15	0,2	Contínuo
3	60	0,15	0,2	Interrompido
4	60	0,15	0,2	Interrompido
5	130	0,15	0,2	Contínuo
6	130	0,15	0,2	Contínuo
7	130	0,15	0,2	Interrompido
8	130	0,15	0,2	Interrompido
9	200	0,15	0,2	Contínuo
10	200	0,15	0,2	Contínuo
11	200	0,15	0,2	Interrompido
12	200	0,15	0,2	Interrompido
13	240	0,15	0,2	Contínuo
14	240	0,15	0,2	Contínuo
15	240	0,15	0,2	Interrompido
16	240	0,15	0,2	Interrompido

Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS

Nessa seção são apresentados e discutidos os resultados do trabalho experimental, iniciando pela composição química do material, as análises metalográficas da amostra sem tratamento e com tratamento térmico, seguido pela dureza, desgaste das ferramentas e seus mecanismos, rugosidade e morfologia dos cavacos.

4.1 Análise da Composição Química, Metalográfica e Dureza

O resultado da análise química através de espectrometria de emissão óptica com espectrômetro SPECTROMAXx. Os valores encontrados estão condizentes com os que são estabelecidos através da regulamentação normativa AISI (ver Tabela 1), e é apresentado na Tabela 4.

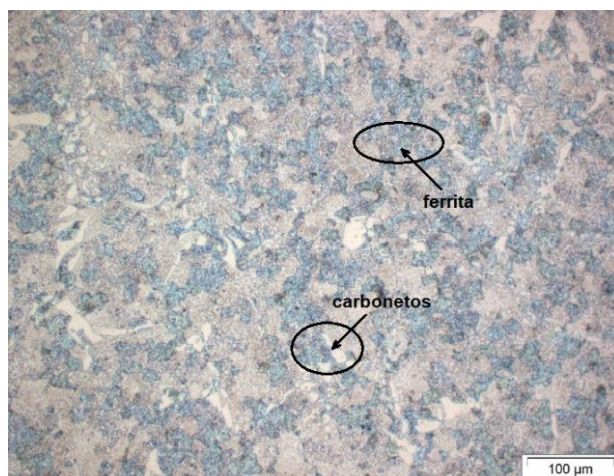
Tabela 4 - Espectrometria AISI D2

C %	Mn %	Cr %	Mo %	V %
1,5865	0,3256	11,6740	0,6818	0,8324

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 31, é apresentada a microestrutura do aço AISI D2 em seu estado normalizado, sem a submissão de tratamento térmico de tempera e revenimento com ampliação de 200x e reativo Vilella. Nota-se uma grande presença de ferrita e carbonetos, característicos desse tipo de aço, em função da sua composição química, onde, através dos elementos de liga, promovem a anuência de carbonetos na microestrutura.

Figura 31 - Análise Metalográfica AISI D2 – Sem Tratamento

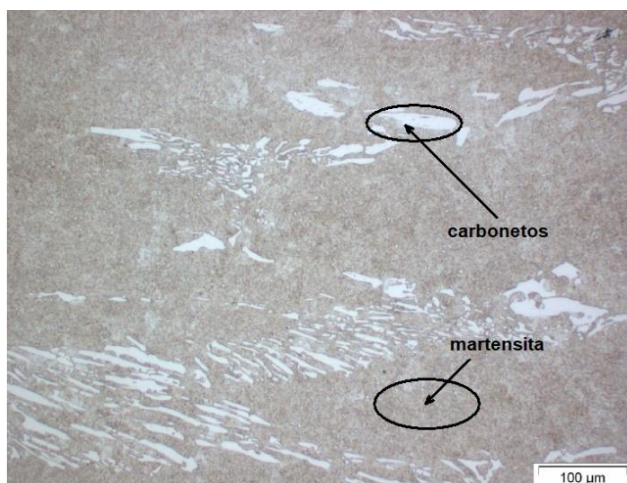


Fonte: Elaborado pelo autor

A dureza medida antes do tratamento térmico foi realizada e encontrou-se o valor médio de 15,17 HRC, onde esperava-se encontrar por volta de 17HRC, valor que é tipicamente encontrado nesse tipo de aço sem tratamento térmico em estado normalizado.

Posteriormente, foi realizado as análises após tratamento de têmpera e revenimento. Na Figura 32 é mostrada a microestrutura do aço após os tratamentos realizados.

Figura 32- Microestrutura do Aço AISI D2 - Tratado Termicamente



Fonte: Elaborado pelo autor

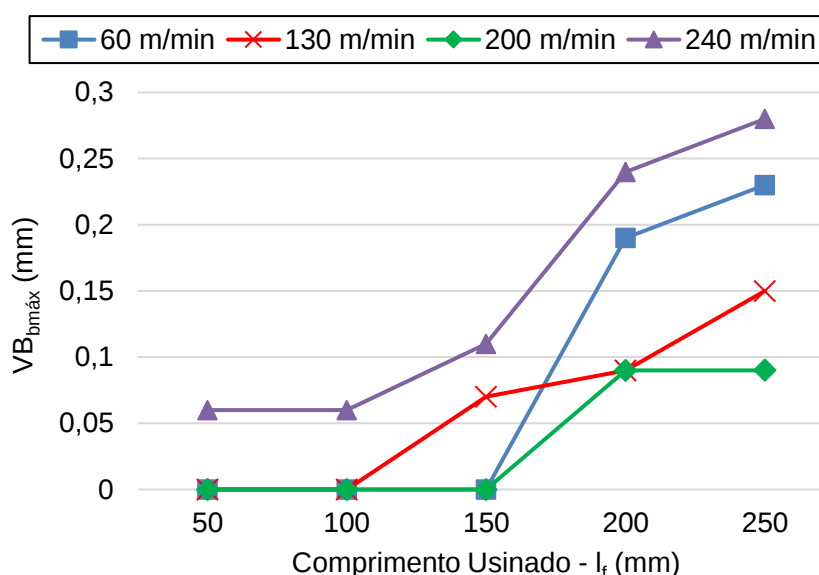
Conforme esperado, é notado a presença maciça de martensita em toda região analisada, além de grande parte de carbonetos. A imagem obtida com ampliação de 200x e reativo Vilella.

Em relação a dureza do material após tratamento térmico de têmpera e revenimento, encontrou-se como valor médio 59,86 HRC, conforme esperado.

4.2 Análise dos Desgastes da Ferramenta de Corte

São apresentados a seguir, os resultados do desgaste de flanco máximo $VB_{Bmáx}$, e as análises dos mecanismos em cada faixa de velocidade de corte nas duas condições usinadas. A busca pelo melhor parâmetro de corte no que diz respeito a sua velocidade de corte, para minimizar o desgaste da ferramenta é fundamental pois promove uma maior vida útil e, portanto, reduz os custos de um processo produtivo. Em todos os ensaios, como já mencionado anteriormente, foi mantido constante a profundidade de corte com 0,2 mm e o avanço em 0,15 mm/rot. O único parâmetro variado foi a velocidade de corte (V_c). Na Figura 33 é apresentada a evolução do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) em função do comprimento usinado (l_f) para as curvas de velocidades de corte na condição de corte contínuo.

Figura 33 - Evolução do $VB_{Bmáx}$ em Função do Comprimento Usinado (l_f) no Corte Contínuo

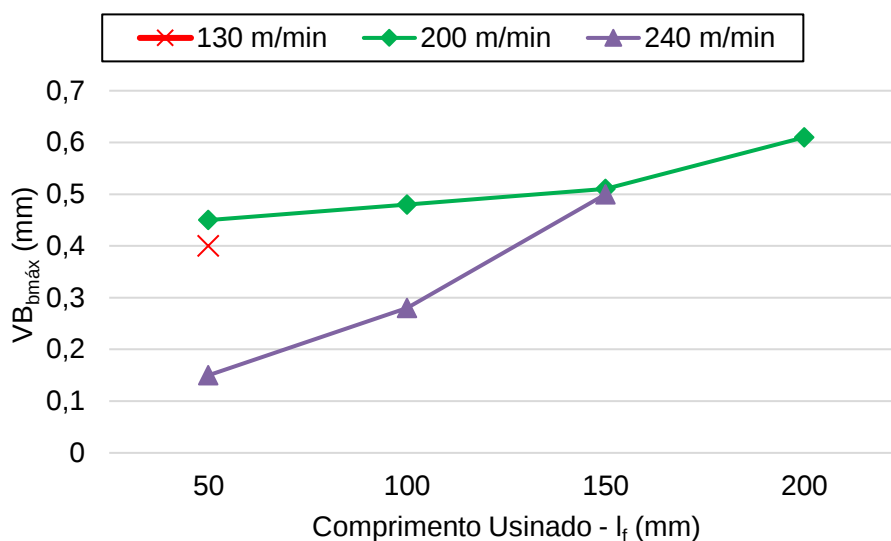


Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise para corte contínuo em velocidade de corte de 60 m/min, é observado valores somente a partir de $l_f = 200$ mm, tendo $VB_{Bmáx} = 0,19$ mm e atingindo um valor máximo de 0,23 mm ao final dos passes. Em relação a curva de velocidade de corte 130 m/min, apenas foi possível de medir a partir de 150 mm de comprimento usinado, iniciando com $VB_{Bmáx} = 0,07$ mm, tendo seu valor máximo de desgaste de 0,15 mm em $l_f = 250$ mm. Já na faixa de velocidade de corte de 200 m/min, apenas no comprimento usinado de 200 mm, o $VB_{Bmáx}$ foi de 0,09 mm e manteve o valor até o último passe. Percebe-se que a evolução do desgaste de flanco máximo para a $V_c = 240$ m/min apresentou valores desde o primeiro passe com 0,06 mm, até atingir o valor máximo de $VB_{Bmáx} = 0,28$ mm.

A evolução do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) em função do comprimento usinado (l_f) para as curvas de velocidades de corte na condição de corte interrompido é mostrada na Figura 34.

Figura 34 Evolução do $VB_{Bmáx}$ em Função do Comprimento Usinado (l_f) no Corte Interrompido



Fonte: Elaborado pelo autor

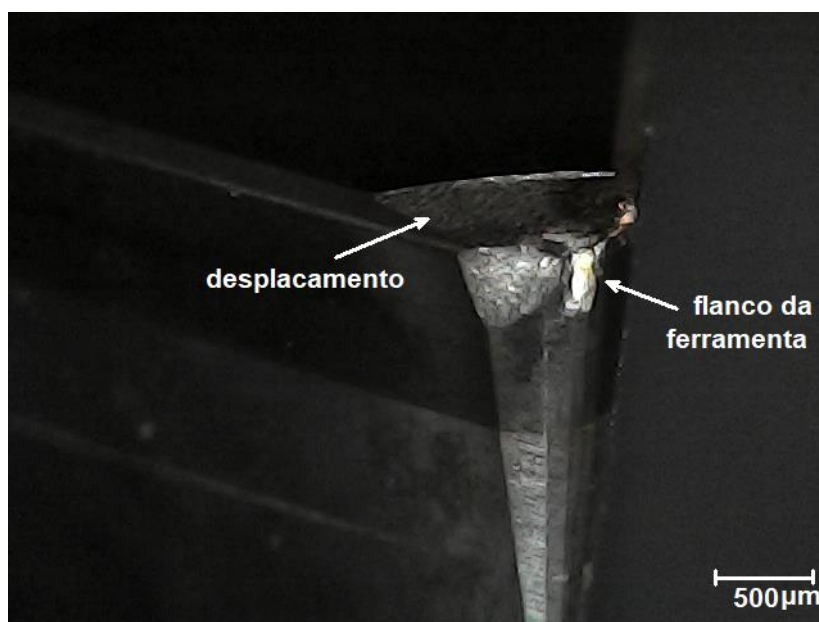
Na faixa de velocidade de corte de 60 m/min, não foi possível realizar nenhuma medição em função de falha catastrófica logo no primeiro instante de corte. Em 130 m/min é medido o desgaste apenas no primeiro passe ($l_f = 50$ mm), pois logo no próximo comprimento usinado a ferramenta falhou. Não foi possível realizar a medição do desgaste no comprimento usinado de 250 mm em nenhuma das faixas de velocidade de corte, em função de quebras e falhas catastróficas anteriores.

No geral, puderam ser observados diferentes mecanismos para as condições tribológicas impostas. Os desgastes de cratera e flanco foram os mais evidentes durante o corte contínuo, em concordância com as descobertas dos autores Gutnichenko *et al.*, (2021), Boing *et al.*, (2021) e Khan, Sarmad Ali *et al.*, (2020), conforme citado anteriormente. O aumento da velocidade de corte provocou uma mudança no tipo de mecanismo de desgaste. No corte interrompido, o lascamento se destaca, além de ocorrer falha catastrófica. A seguir, é abordada uma análise mais detalhada do corte contínuo e do corte interrompido em cada uma das velocidades de corte utilizadas.

4.2.1 Corte Contínuo – Velocidade de Corte 60 m/min

Nessa faixa de velocidade de corte, é possível notar um desprendimento de material da superfície de saída da ferramenta e um desgaste de flanco significativo (Figura 35). O movimento relativo entre peça e a ferramenta promoveu o deslocamento tanto do próprio material aderido como de pequenas partículas da ferramenta. Tal situação caracteriza o mecanismo de adesão (*attrition*) que ocorre a baixas velocidades de corte e temperaturas menores.

Figura 35 - Morfologia do Desgaste da Ferramenta em Corte Contínuo com Velocidade de Corte 60 m/min

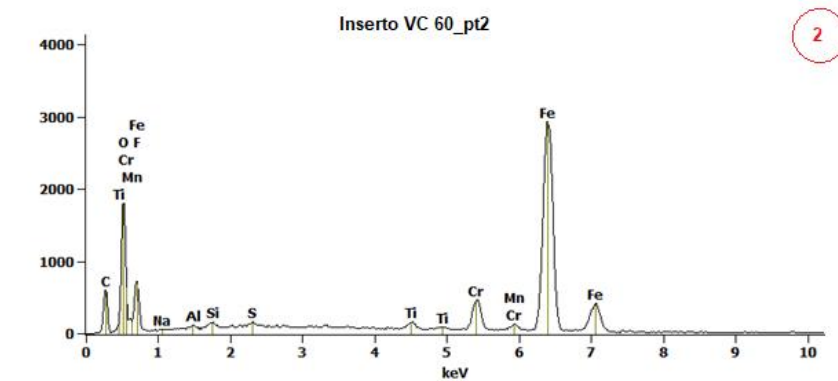
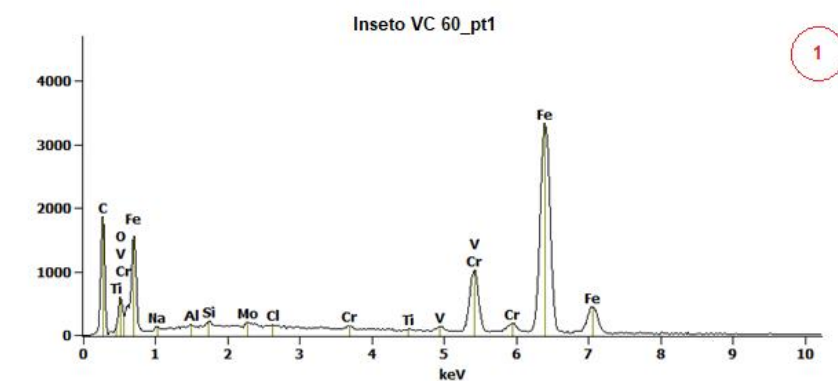
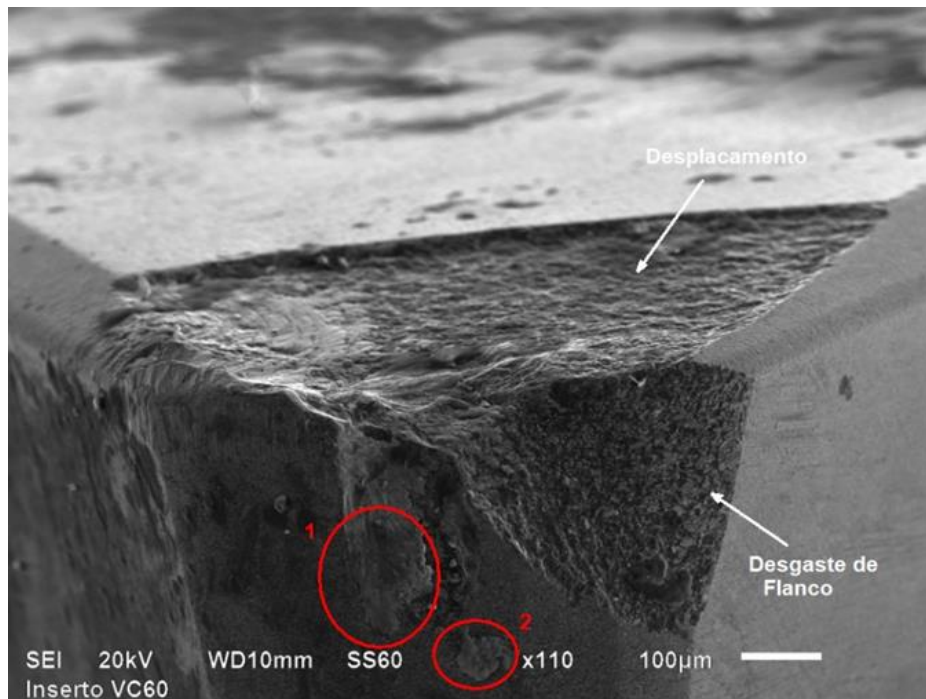


Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 36, é apresentada uma imagem obtida através de microscopia eletrônica de varredura do estado final da ferramenta seguido de uma espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplada ao (MEV).

Nos pontos destacados (1 e 2), o resultado da análise apontou a presença dos elementos como Ferro (Fe), Cromo (Cr) e Vanádio (V) condizentes com a composição química do corpo de prova usinado, caracterizando material aderido a ferramenta. Autores como Trent e Wright (2000) e Klocke (2011), afirmam que as partículas aderidas são formadas pela interação entre ferramenta e cavaco, ou da ação de elevadas forças durante o torneamento, ocorrendo de um modo geral em baixas velocidades de corte e caracterizam um mecanismo de desgaste por *attrition*.

Figura 36 - Estado Final da Ferramenta e Partículas de Material Aderido com Indicação de Espectro EDS dos Pontos 1 e 2 Após o Último Passe – (Corte Contínuo – Velocidade de Corte 60 m/min)

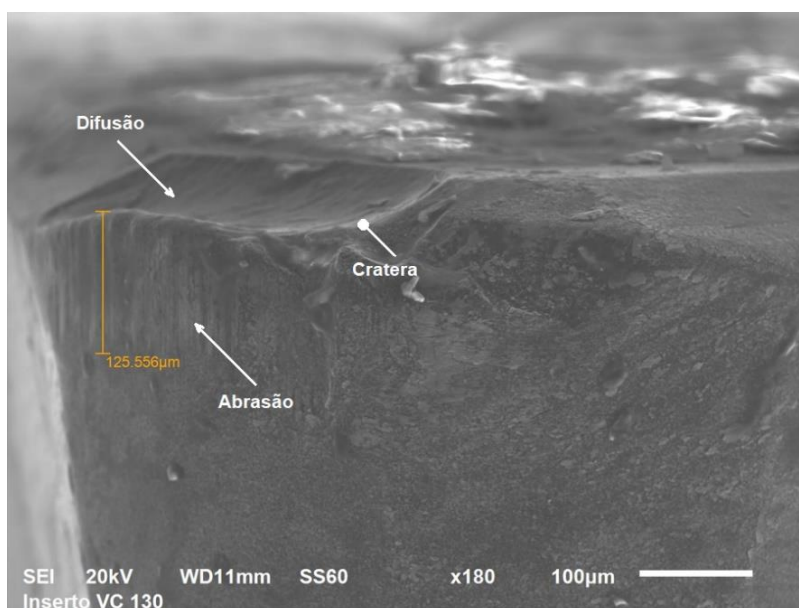


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Corte Contínuo – Velocidade de Corte 130 m/min

O desempenho da ferramenta nessa faixa de velocidade de corte ocorreu de maneira satisfatória, apresentando valor de desgaste de flanco máximo (0,15 mm) e a menor rugosidade superficial (abordado no próximo tópico) no último passe. Na Figura 37 é apresentado o desgaste ocorrido.

Figura 37 Estado Final da Superfície de Saída e Principal de Folga da Ferramenta Obtidas por MEV – (Corte Contínuo – Velocidade de Corte 130 m/min)



Fonte: Elaborado pelo autor

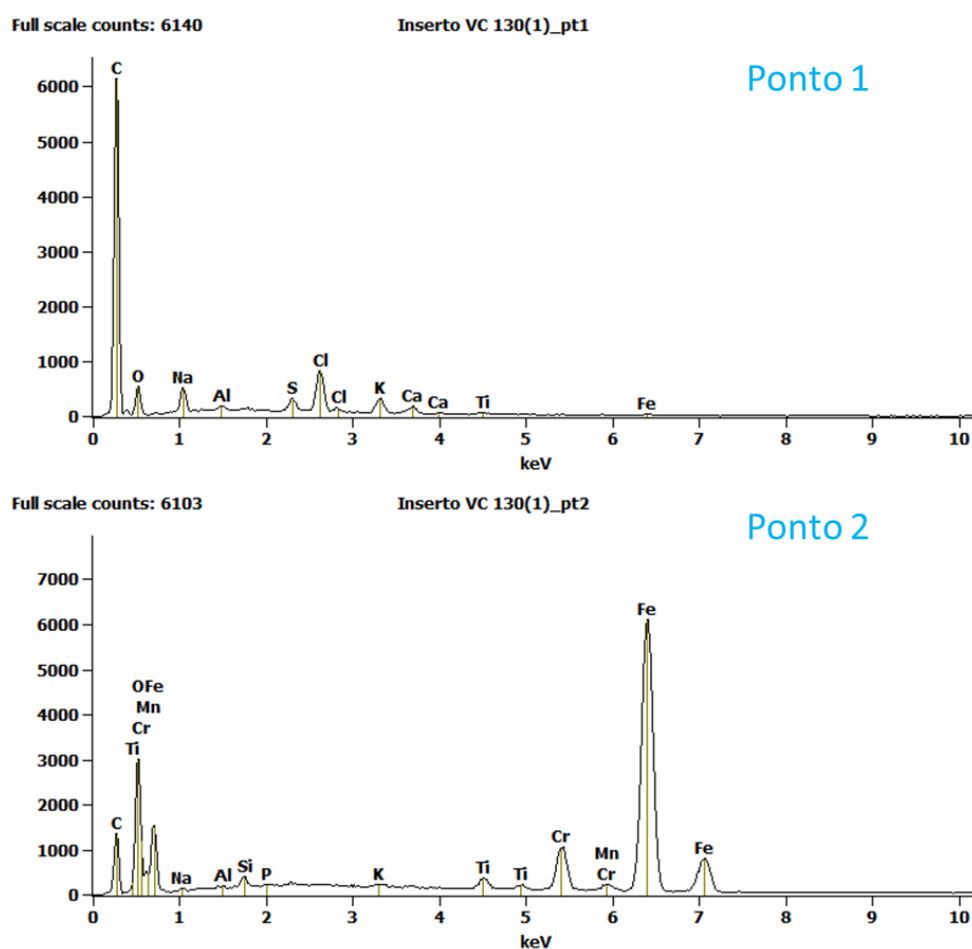
A partir da imagem obtida, é possível observar a presença dos desgastes de cratera e flanco. O mecanismo de abrasão presente em todo o corte contínuo, provoca os dois tipos de desgastes. Além dele, é destaque o mecanismo de difusão devido a evidência de aspecto liso característico do processo difusivo. (SANTOS e SALES, 2007). Para investigar o interior da cratera foi realizado também uma análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplada ao (MEV) na qual é apresentada na Figura 38. Foram verificados quatro pontos, a fim de confirmar as hipóteses (Figura 39 e 40). Os resultados apontaram a presença de elementos que compõe o material usinado dentro do interior da cratera.

Figura 38 – Análise (MEV) dos Pontos Analisados – Corte Contínuo $V_c = 130$ m/min



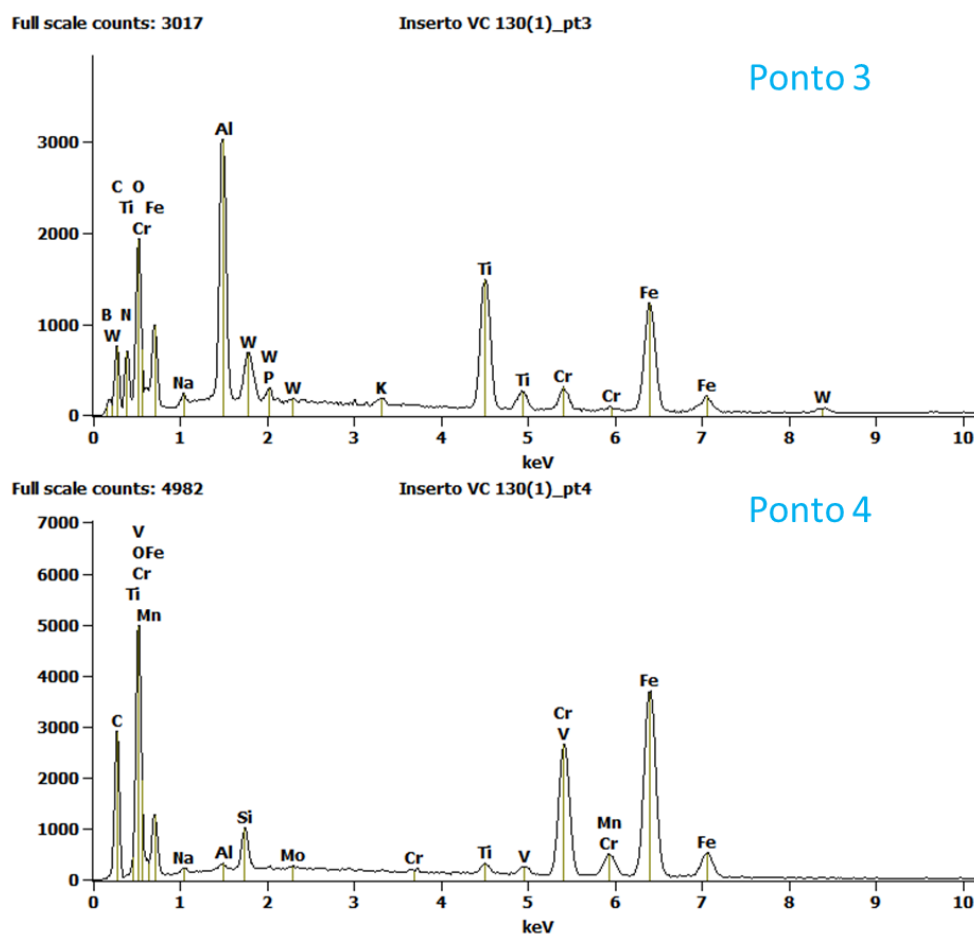
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39 - Análise (EDS) dos pontos 1 e 2 – Corte Contínuo $V_c = 130$ m/min



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40 - Análise (EDS) dos pontos 3 e 4 – Corte Contínuo $V_c = 130$ m/min



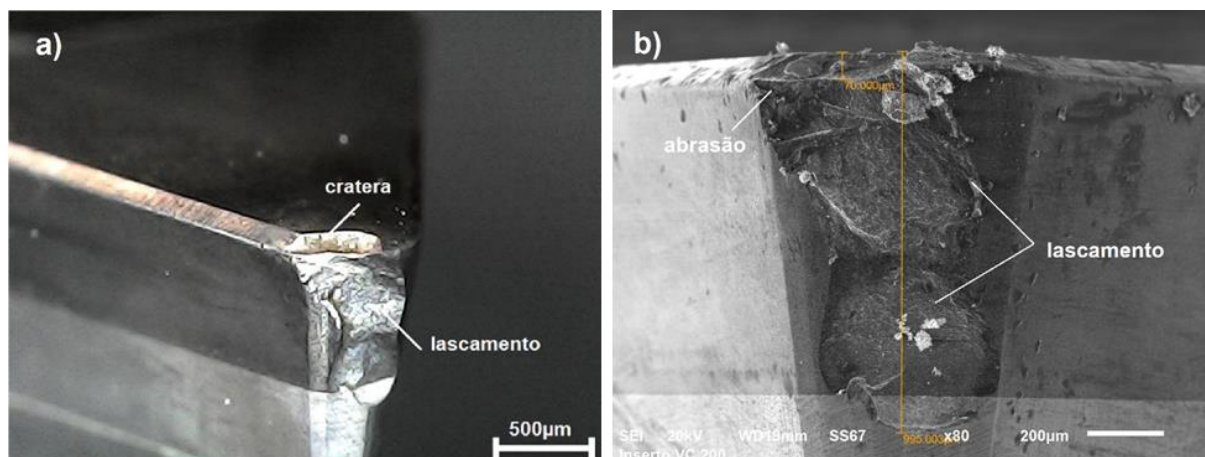
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Corte Contínuo – Velocidade de Corte 200 m/min

A ferramenta nesta faixa de velocidade de corte (faixa de maior valor recomendado pelo fabricante), obteve seu comportamento satisfatório até o penúltimo passe, com $VB_{Bmáx} = 0,09$ mm, culminando com um pequeno lascamento no estado final, mas sem alterações no acabamento superficial do material.

De uma maneira geral, o desgaste ocorrido não é proveniente apenas de um mecanismo, mas sim de uma combinação de vários deles. As características do aço AISI D2 endurecido (presença grande de carbonetos, resistência à alta temperatura), ocasionaram em grande parte das velocidades de corte estudadas, um intenso desgaste proporcionando um tempo de vida reduzido. Ocorreram os mecanismos de difusão e abrasão, por provocarem uma cratera considerável na superfície de saída e o processo de lascamento ocorrido no último passe, conforme mostrado na Figura 41.

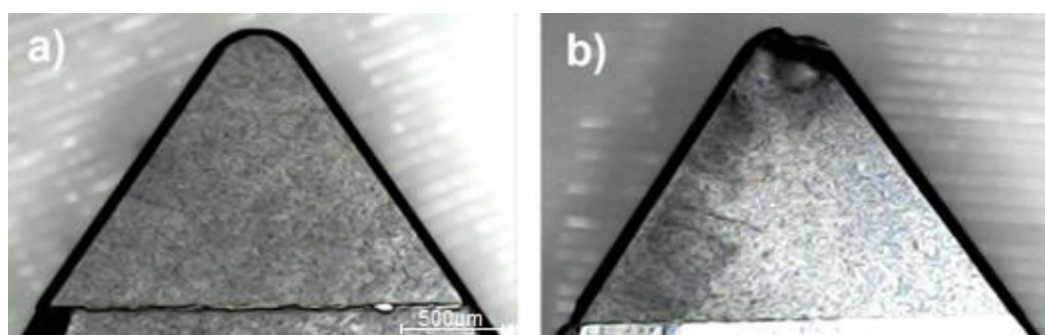
Figura 41 - Estado Final da Superfície de Saída e Principal de Folga da Ferramenta: a) com Microscópio Ótico b) com (MEV) – (Corte Contínuo – Velocidade de Corte 200 m/min)



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 42, é apresentada uma comparação entre a ferramenta em estado inicial (gume novo) e após os testes terem sido realizados. É notório a percepção da mudança de sua forma original, resultante da perda gradual de material. Essa destruição está relacionada a alterações geométricas, e definem, segundo a norma ISO 3685 (2017) o conceito de desgaste, onde apresenta mudança da geometria da ferramenta de corte por perda de massa.

Figura 42 - Comparação da Morfologia da Ferramenta: a) Ferramenta Nova b) Estado Final



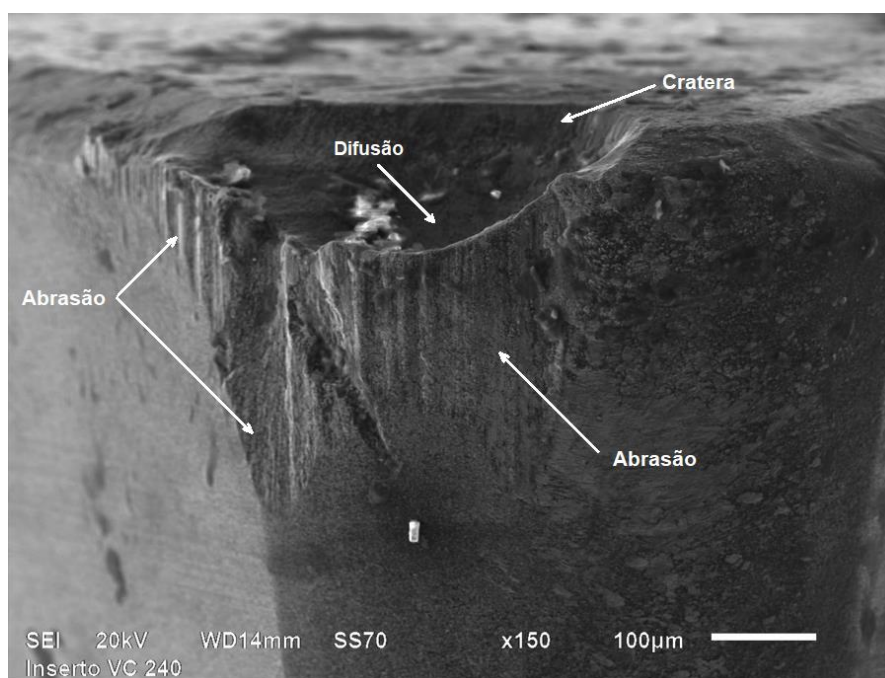
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.4 Corte Contínuo – Velocidade de Corte 240 m/min

No ensaio com velocidade de corte 240 m/min (acima da faixa de maior valor recomendado pelo fabricante), a ferramenta comportou-se de maneira satisfatória

principalmente na atuação com gume novo e no posterior passe. Apresenta-se um pequeno desgaste de flanco desde os passes iniciais, entretanto, não há prejuízo no seu desempenho em termos de acabamento superficial. Inicialmente, manteve-se um $VB_{Bmáx} = 0,06$ mm até o comprimento usinado de 100 mm e em seguida um aumento de 0,24 mm até atingir 0,28 mm no $l_f = 250$ mm, sendo o maior desgaste de flanco máximo registrado entre os ensaios em corte contínuo. Borges (2020), Pereira (2019) e Lima (2012), já haviam observado, anteriormente, que a velocidade de corte é o parâmetro mais influente no desgaste de flanco, tendo efeito diretamente na vida da ferramenta de corte. Logo, esperava-se que nessa faixa de velocidade de corte ocorreria o maior desgaste. Na Figura 43 é possível observar o estado final das superfícies de saída e flanco da ferramenta obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 43- Estado Final da Superfície de Saída e Principal de Folga da Ferramenta Obtidas por MEV– (Corte Contínuo – Velocidade de Corte 240 m/min)

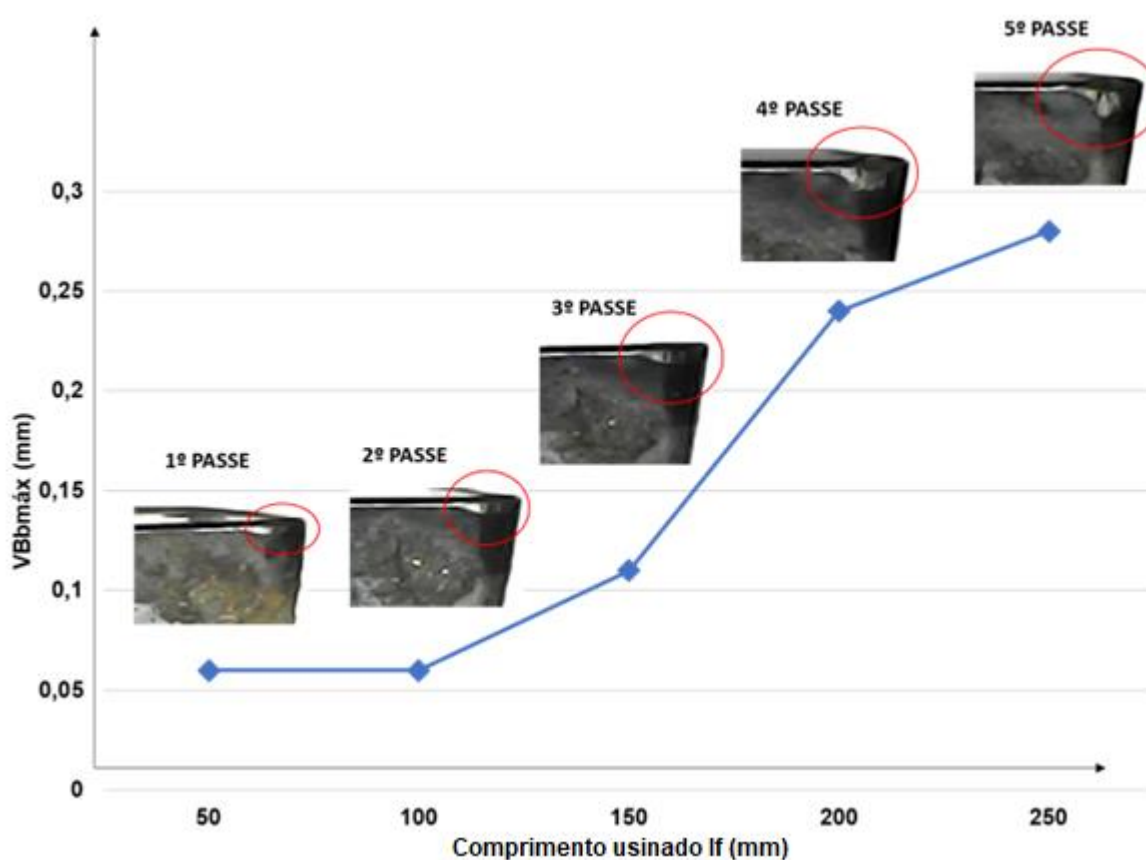


Fonte: Elaborado pelo autor

. Como pode ser observado, o desgaste de cratera provocado pelos mecanismos de abrasão seguido de difusão, mais uma vez foi predominante, além do desgaste de flanco. Segundo Trent e Wright, (2000), Diniz e Oliveira (2018), as altas temperaturas presentes na região do corte tende a estimular os dois mecanismos citados. Isso porque a remoção de fragmentos da ferramenta por abrasão, favorece a troca de partículas entre ferramenta e cavaco (difusão). Não houve a presença de trincas ou lascamentos nessa faixa de velocidade

de corte, o que se torna uma escolha interessante no que tange a produtividade. Velocidades de corte mais altas implicam em aumento da produção e, por conseguinte, na redução do *Lead Time*, possibilitando a garantia de melhor qualidade e precisão dos produtos. (NAWAZ *et al.*, 2020). Na Figura 44 é apresentada a evolução do desgaste de flanco em função do comprimento usinado, com as imagens registradas em cada passe realizado.

Figura 44 - Evolução do Desgaste de Flanco Máximo em Função do Comprimento Usinado com as Imagens Registradas



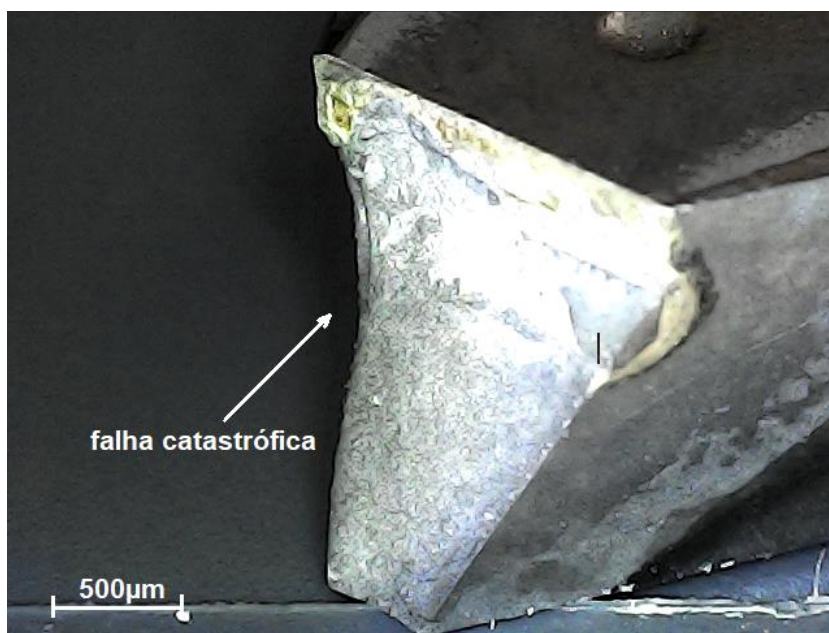
Fonte: Elaborado pelo autor

Através das imagens registradas, é possível notar a evolução do desgaste de flanco que aumenta com o comprimento usinado. Como já mencionado, o desgaste aparente notado no último passe não prejudica o acabamento superficial, trazendo conclusões positivas para essa faixa de velocidade de corte, já que se encontra acima da recomendação do fabricante.

4.2.5 Corte Interrompido – Velocidade de Corte 60 m/min

Nessa velocidade a ferramenta se comportou de maneira insatisfatória. Logo nos primeiros instantes do corte a ferramenta falhou. Na Figura 45 é apresentado o estado da ferramenta após a tentativa de corte no primeiro passe.

Figura 45 – Estado Final da Ferramenta – (Corte contínuo – Velocidade de Corte 60 m/min)



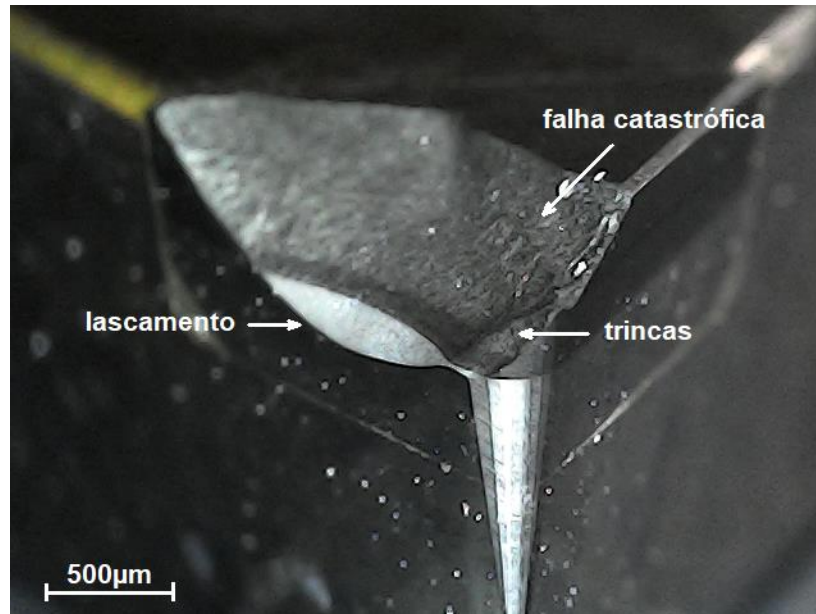
Fonte: Elaborado pelo autor

A condição tribológica severa, seguida pelo número maior de entradas e saídas, provocou a falha. A tenacidade da ferramenta não foi capaz de suportar impactos do corte interrompido, impulsionados pela baixa velocidade de corte. A avaria foi provocada por choques mecânicos que levaram à destruição total do gume, impossibilitando a continuação do ensaio.

4.2.6 Corte Interrompido – Velocidade de Corte 130 m/min

A velocidade de corte nessa faixa aparentemente demonstrou um desempenho satisfatório. Contudo, logo após um comprimento usinado de 50 mm, a ferramenta, assim como na faixa anterior, sofreu uma falha catastrófica, resultando na quebra total da aresta de corte. O estado final é apresentado na Figura 46.

Figura 46 - Estado Final da Ferramenta – (Corte contínuo – Velocidade de Corte 130 m/min)



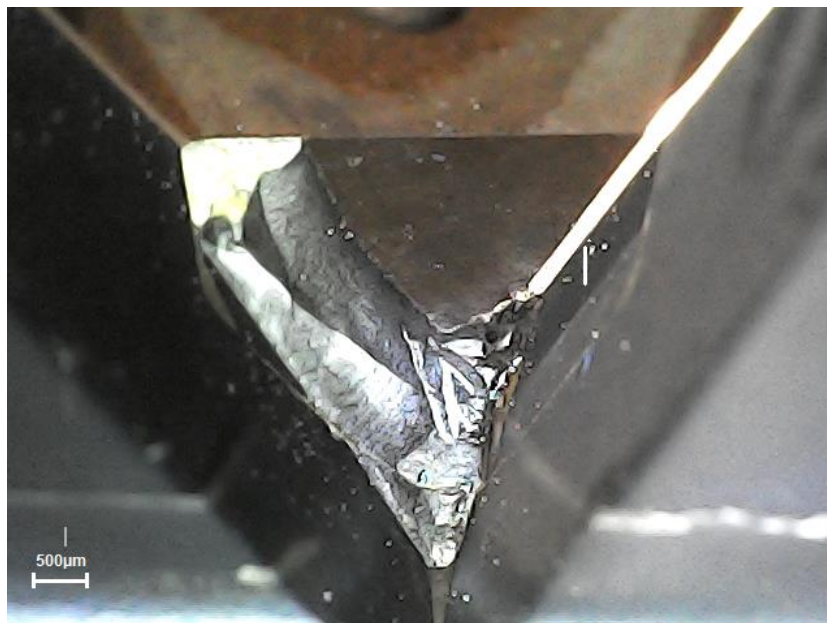
Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar a quebra que impediu a continuação do ensaio. Além disso, é evidente um pequeno lascamento na aresta principal de corte, junto com trincas de origem mecânica, resultantes dos choques nas entradas e saídas interrompidas na face do material ensaiado. Esses danos foram causados pela falta de tenacidade da ferramenta.

4.2.7 Corte Interrompido – Velocidade de Corte 200 m/min

No teste com a ferramenta em maiores velocidades de corte, observou-se um desempenho ligeiramente mais satisfatório do que nos testes anteriores. Nesse cenário, o ensaio foi conduzido até o quarto passe, resultando na quebra do inserto durante o último passe. A ferramenta de corte após a quebra é ilustrada na Figura 47.

Figura 47 - Estado Final da Ferramenta – (Corte contínuo – Velocidade de Corte 200 m/min)



Fonte: Elaborado pelo autor

No corte interrompido, a ferramenta a essa velocidade de corte obteve o melhor desempenho, alcançando um comprimento usinado de 200 mm, como mencionado. O desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) na primeira medição foi de 0,45 mm, aumentando para 0,61 mm antes da quebra no quarto passe. Conclui-se, portanto, que para esse composto de PCBN, as altas velocidades de corte resultam em uma vida útil mais prolongada da ferramenta em corte interrompido, em comparação com as menores velocidades testadas de 60 m/min e 130 m/min.

4.2.8 Corte Interrompido – Velocidade de Corte 240 m/min

Na indicação da maior faixa de velocidade de corte indicada pelo fabricante, a ferramenta conseguiu alcançar apenas 150 mm de comprimento usinado. No penúltimo passe, houve novamente quebra total da aresta de corte, como pode ser visto na Figura 48.

Figura 48 - Estado Final da Ferramenta – (Corte contínuo – Velocidade de Corte 240 m/min)



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme observado na avaliação da faixa de velocidade anterior, o desempenho inicial seguiu conforme o esperado. Houve um aumento progressivo do desgaste, iniciando em $VB_{Bmáx} = 0,15$ mm e atingindo o valor de 0,50 mm. No entanto, uma considerável avaria de origem mecânica ocorreu, resultado dos choques suportados, semelhantes aos observados em outras velocidades testadas.

Pode-se concluir que os desgastes tanto no corte contínuo quanto no corte interrompido nem sempre coincidem com os resultados de outros estudos, já que condições adversas podem influenciar significativamente os resultados. Além disso, os parâmetros de corte e o sistema de fixação da peça e ferramenta no torneamento duro são fatores de extrema importância, especialmente diante das condições severas impostas pelo corte interrompido.

4.3 Análise da Rugosidade

Para avaliar o acabamento superficial, foram analisados a evolução da rugosidade da superfície, comparando vários aspectos, como a influência da velocidade de corte em função dos comprimentos de usinagem, tanto em condições de corte contínuo quanto interrompido. Embora o avanço seja o parâmetro mais influente no acabamento superficial (FERRARESI, 2014), (MACHADO *et al.*, 2015), outras condições como raio da ponta da ferramenta (ZHAO, T. *et al.*, 2017) tem influência significativa na qualidade da superfície e devem ser avaliadas para a melhor compreensão do processo. De acordo com De Oliveira e Diniz (2009), as

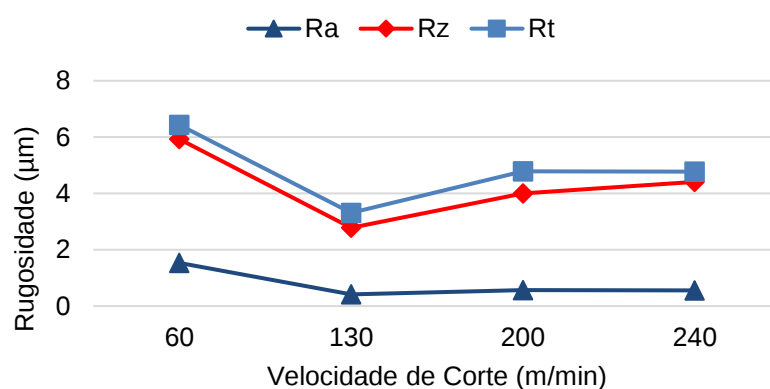
variações nos valores da rugosidade estão relacionadas com as mudanças da topografia da ferramenta em função da taxa de desgaste, que tende a ser transferidas para a superfície da peça. Assim, o comportamento da rugosidade e da superfície desgastada da ferramenta podem estar diretamente correlacionados.

São avaliados os parâmetros de rugosidade altura total do perfil (R_t), desvio aritmético médio (R_a) e altura máxima do perfil (R_z). As primeiras análises se referem a corte contínuo e na sequência em corte interrompido. Ao final desse tópico, é feita uma análise comparativa entre as duas condições de corte.

4.3.1 Avaliação das Rugosidades em Corte Contínuo

Inicialmente, na Figura 49, é apresentada a influência da velocidade de corte na rugosidade do aço AISI D2 em corte contínuo. Observa-se um comportamento semelhante nos três parâmetros avaliados. Inicialmente, houve uma redução nos valores de rugosidade na velocidade de corte de 130 m/min em comparação com 60 m/min, 200 m/min e 240 m/min. Nessas duas últimas faixas, os resultados apresentaram pouca variação, demonstrando uma estabilidade na condição de corte contínuo.

Figura 49 - Efeito da Velocidade de Corte na Rugosidade Superficial do Aço AISI D2 nos Parâmetros R_a , R_z e R_t no Corte Contínuo



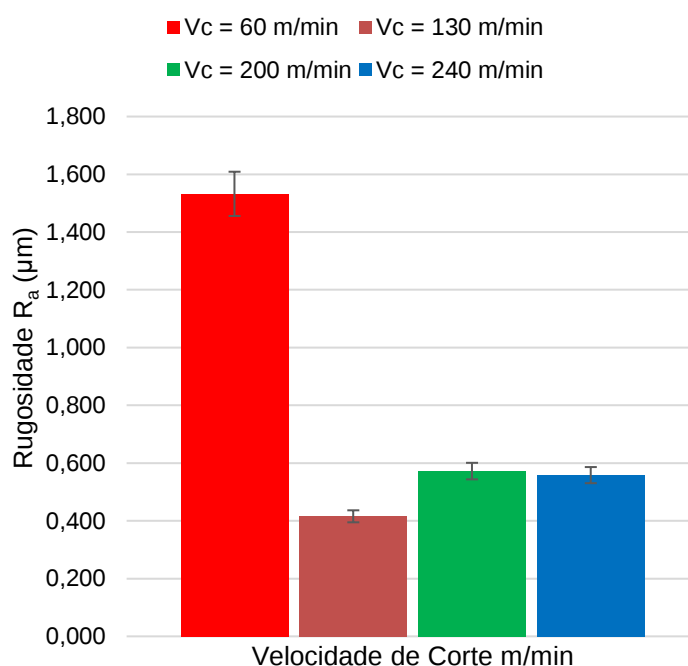
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 50, é mostrada uma comparação da medição da rugosidade média (R_a) da superfície final com as diferentes velocidades de corte durante a análise em corte contínuo. Destaca-se um desempenho melhor na faixa de velocidade de corte de 130 m/min, atingindo um valor de 0,416 μm . Essa condição é favorável para operações de acabamento e pode ser

usado para caracterizar a qualidade da usinagem, pois influencia as propriedades funcionais de um componente usinado (ANUPAM *et al.*, 2015).

Por outro lado, a velocidade de corte de 60 m/min, obteve o pior resultado (1,532 μm) dentro as faixas avaliadas. Os resultados obtidos para essa condição de corte, situam-se na classe de rugosidade (R_a) N5 e N6.

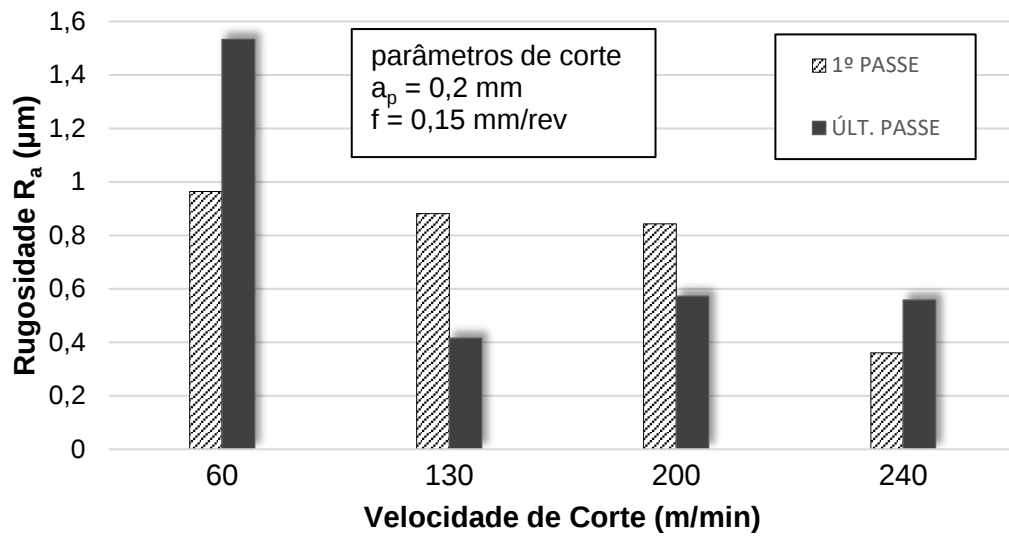
Figura 50 - Rugosidade média (R_a) em Função da Variação das Velocidades de Corte na Condição de Corte Contínuo



Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir, é feita uma comparação entre a ferramenta com a aresta nova (primeiro passe) e a condição final (último passe). A faixa de velocidade de corte que apresentou a maior variação entre o valor inicial e o final foi a 60 m/min, registrando um aumento de cerca de 58,9 %. Em contrapartida a faixa de 200 m/min demonstrou a menor variação, com uma diminuição de 32% no valor da rugosidade, como é mostrado na Figura 51.

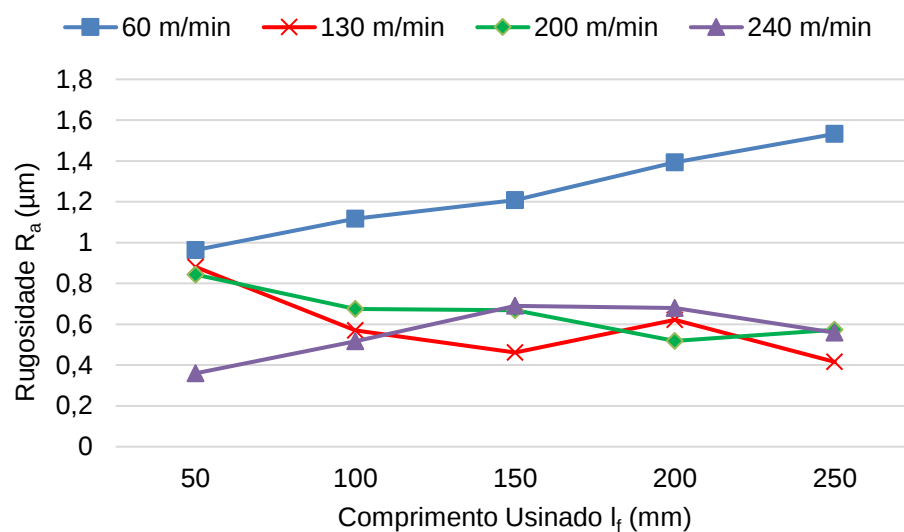
Figura 51 - Comparação da Rugosidade Média (R_a) em Função das Velocidades de Corte no Primeiro e Último Passe em Corte Contínuo



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos três gráficos a seguir, é possível observar a evolução dos parâmetros medidos em todas as faixas de velocidade de corte em relação ao comprimento usinado (l_f), acompanhados das análises correspondentes. Parâmetros R_a , R_z e R_t são representados nas Figuras 52, 53 e 54, respectivamente.

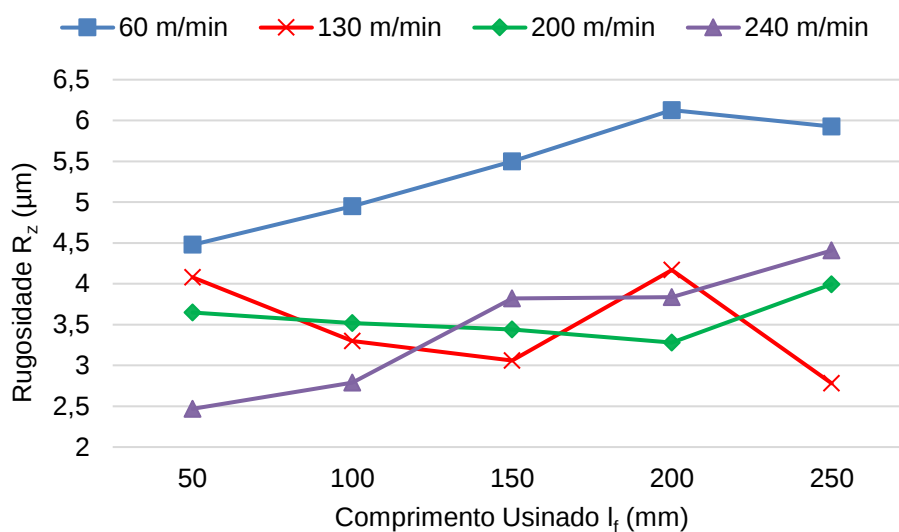
Figura 52 - Evolução da Rugosidade Média (R_a) em Função do Comprimento Usinado (l_f) para as Velocidades de Corte Avaliadas



Fonte: Elaborado pelo autor

O aumento do desgaste na ferramenta a 60 m/min nos últimos passes foi capaz de gerar um aumento significativo em sua rugosidade, atingindo o valor máximo de 1,53 μm . Pode-se afirmar que, dentro do intervalo entre 130 e 240 m/min, a rugosidade média não apresentou grandes variações ficando em torno de 0,60 μm .

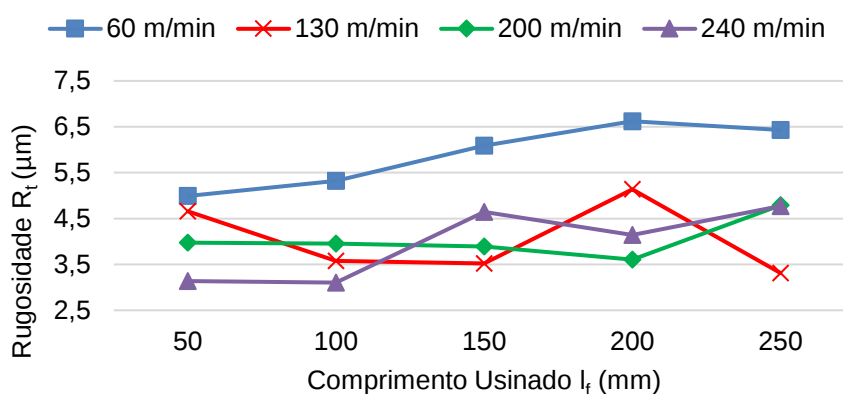
Figura 53 – Evolução da Rugosidade Altura Máxima do Perfil (R_z) em Função do Comprimento Usinado (l_f) para as Velocidades de Corte Avaliadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Na avaliação do parâmetro (R_z), observou-se uma altura máxima de rugosidade no quarto passe na faixa de 60 m/min, atingindo o valor de 6,12 μm , enquanto a menor altura foi de 2,46 μm no primeiro passe a 240 m/min. No último passe, o menor valor foi registrado com a velocidade de corte de 130 m/min, apresentando um valor de 2,78 μm .

Figura 54 - Evolução da Rugosidade Altura Total do Perfil (R_t), em Função do Comprimento Usinado (l_f) para as Velocidades de Corte Avaliadas



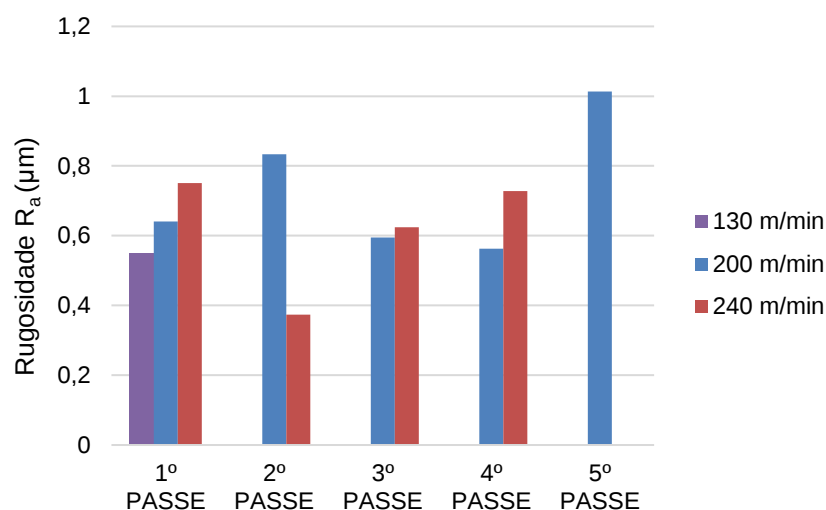
Fonte: Elaborado pelo autor

Os maiores valores encontrados, assim como nos demais parâmetros, estão na faixa de 60 m/min. No último passe, em ambas as faixas de velocidade de corte de 200 e 240 m/min, foram registrados valores iguais, alcançando 4,78 µm. Isso leva à conclusão de que, para velocidades acima de 200 m/min, a altura total do perfil não é influenciada pela velocidade de corte.

4.3.2 Avaliação das Rugosidades em Corte Interrompido

Na análise a seguir, a condição de corte interrompido foi avaliada. O parâmetro de corte a 60 m/min não aparece na Figura 55, pois a medição da rugosidade não foi possível devido à quebra ocorrida no início do corte. Portanto, a comparação é apresentada apenas nas demais faixas de velocidade.

Figura 55 – Evolução da Rugosidade Média (R_a) em Função dos Passes - Corte Interrompido



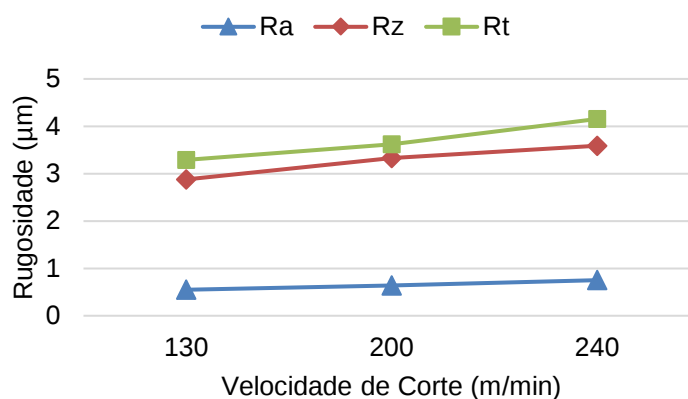
Fonte: Elaborado pelo autor

Na avaliação do primeiro passe, observa-se que a faixa de velocidade de corte que apresentou a menor rugosidade medida foi 130 m/min, com um valor de 0,549 μm , enquanto a maior rugosidade ocorreu no último passe, com uma velocidade de corte de 200 m/min, registrando um valor de 1,013 μm .

A partir do segundo passe, não houve medições de rugosidade para a faixa de 130 m/min devido à quebra da ferramenta, interrompendo o ensaio. O mesmo ocorreu para a faixa de 240 m/min, porém a partir do quarto passe. Esse comportamento foi observado também nos testes da réplica, indicando uma repetibilidade de resultados, com a falha ocorrendo no penúltimo passe.

A avaliação da ferramenta com aresta nova nos três parâmetros de rugosidade, é apresentado na Figura 56.

Figura 56 - Efeito da Velocidade de Corte na Rugosidade Superficial do Aço AISI D2 nos Parâmetros R_a , R_z e R_t no Corte Interrompido



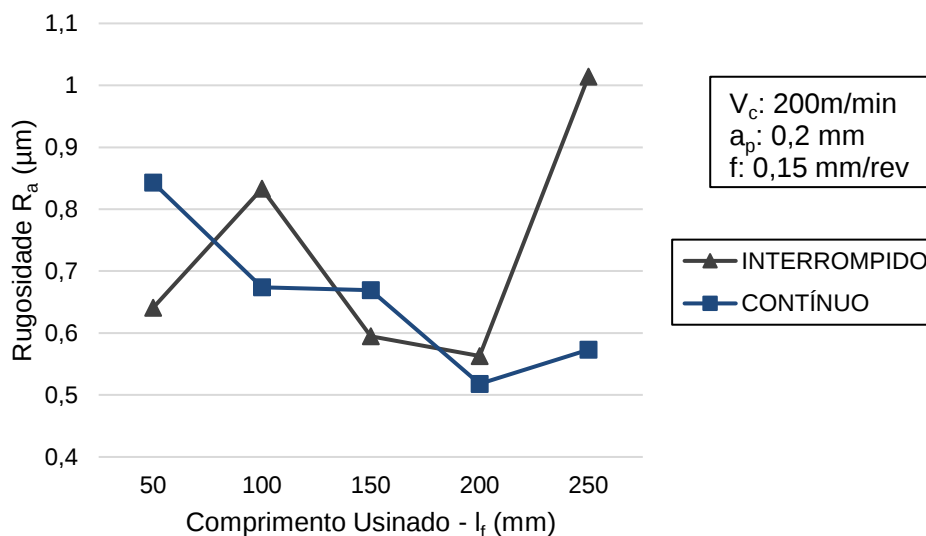
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o aumento da velocidade de corte não teve uma influência significativa nos valores da rugosidade superficial para a ferramenta com a aresta nova. Portanto, nessa faixa de velocidade (de 130 a 240 m/min), o aumento na velocidade de corte exerce uma pequena influência na qualidade superficial quando se trata de ferramentas novas. Em geral, a rugosidade é aumentada à medida que o desgaste progride.

4.3.3 Comparação das Rugosidades - Corte Contínuo e Corte Interrompido

Na comparação entre as condições de corte, a evolução da rugosidade foi confrontada apenas no valor de $V_c = 200$ m/min, já que nas outras faixas analisadas a ferramenta no corte interrompido não conseguiu completar todos os passes propostos. Na Figura 57 são apresentados os resultados da comparação da evolução da rugosidade nas duas condições de corte.

Figura 57 - Comparação da Evolução da Rugosidade Média (R_a) em Função do Comprimento Usinado (l_f) na Condição de Corte Contínuo e Interrompido a $v_c = 200\text{m/min}$.



Fonte: Elaborado pelo autor

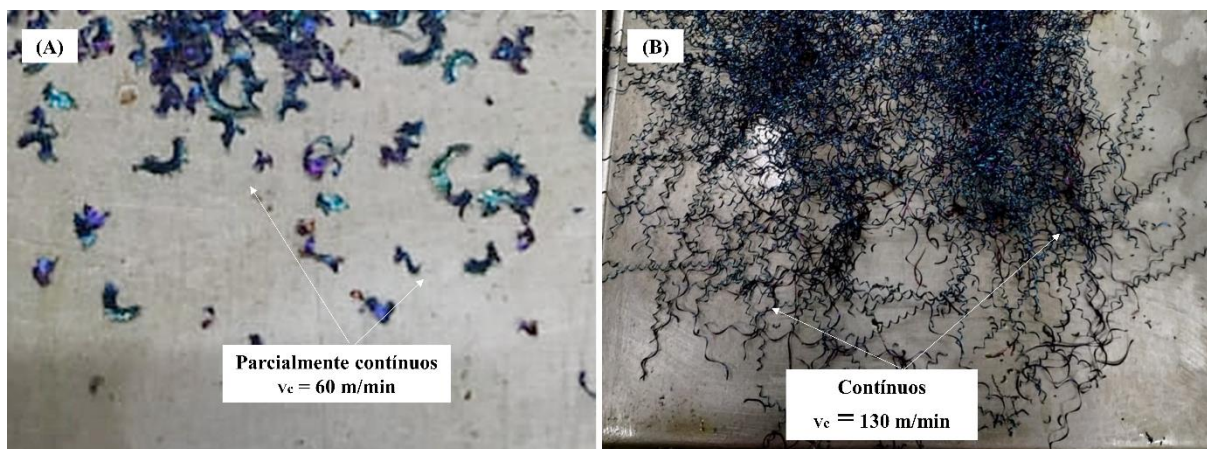
Na comparação entre as duas condições de corte, observa-se resultados semelhantes nos comprimentos de 150 a 200 mm. Tanto no corte contínuo quanto no interrompido, quando a ferramenta alcançou 200 mm de comprimento usinado, a rugosidade atingiu valores de $0,518\ \mu\text{m}$ e $0,563\ \mu\text{m}$, respectivamente. No intervalo de 100 a 150 mm para o corte contínuo, o valor da rugosidade permaneceu com variação mínima, $0,674\ \mu\text{m}$ e $0,669\ \mu\text{m}$. Entretanto, ao atingir um comprimento usinado de 250 mm, a ferramenta no corte interrompido sofreu um lascamento. Esse incidente resultou em um aumento considerável da rugosidade superficial naquele momento, atingindo $1,014\ \mu\text{m}$.

4.4 Análise Morfológica do Cavaco

De acordo com Boing (2016), no torneamento de materiais duros, ocorrem fenômenos distintos dos processos convencionais, especialmente no mecanismo de formação de cavacos. Este mecanismo é regido pela teoria das trincas periódicas, que pressupõe que as trincas se originam na superfície do material e se propagam ao longo do plano de cisalhamento até o gume da ferramenta.

Na Figura 58 é possível observar o formato do cavaco produzido para os ensaios em corte contínuo nas velocidades de corte de 60 e 130 m/min.

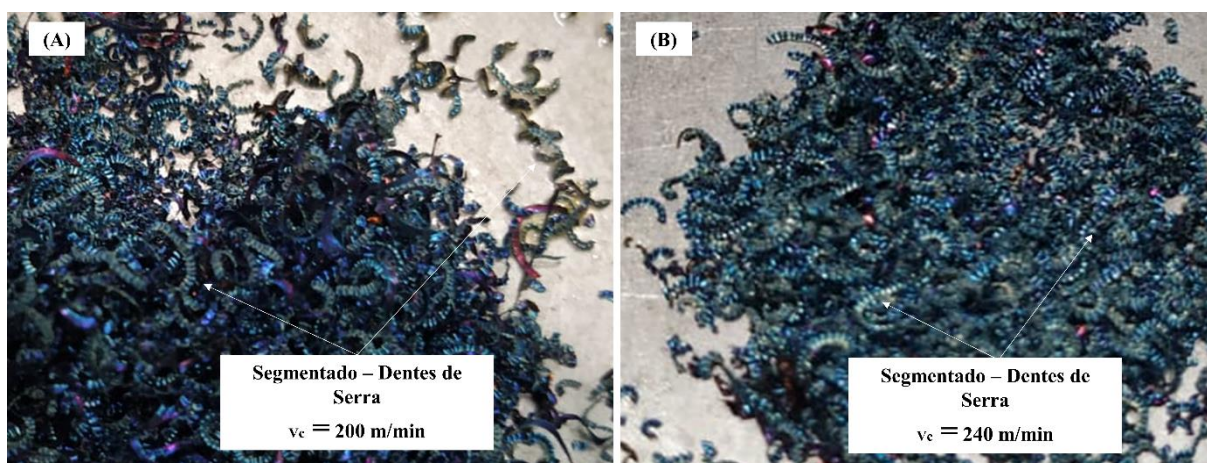
Figura 58 - Morfologia do Cavaco em Corte Contínuo nas Velocidades de Corte de 60 e 130 m/min



Fonte: Elaborado pelo autor

De modo geral, a coloração azulada dos cavacos está associada a uma fina camada de óxido, formada segundos após a constituição do cavaco, em condições de temperatura elevada (REIS *et al.*, 2019). Os cavacos produzidos a 60 m/min apresentaram-se do tipo parcialmente contínuo e na faixa de corte de 130 m/min, predominou o formato contínuo. Na Figura 59 são apresentados os resultados das velocidades de 200 e 240 m/min.

Figura 59 Morfologia do Cavaco em Corte Contínuo nas Velocidades de Corte de 200 e 240 m/min



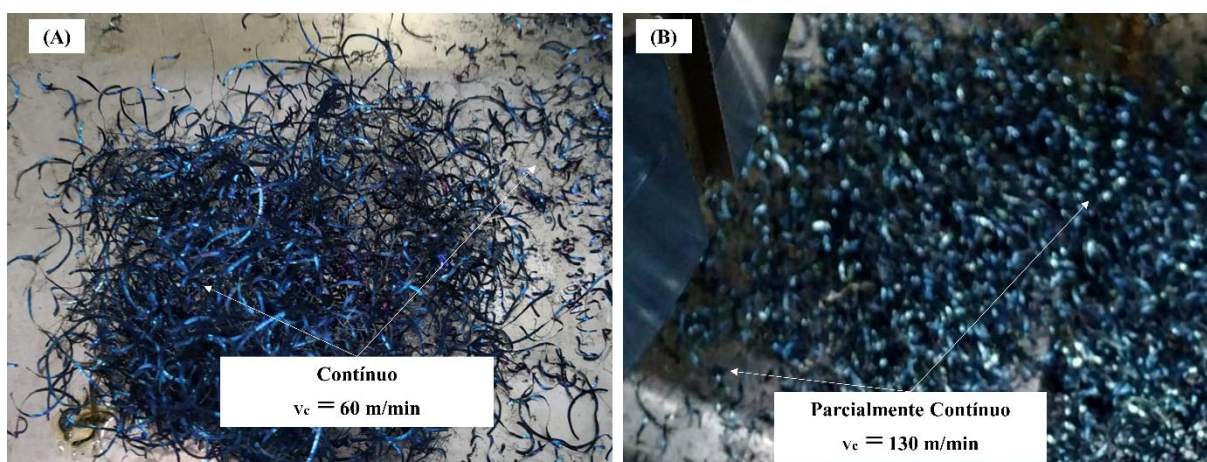
Fonte: Elaborado pelo autor

Os cavacos nas duas faixas analisadas, assumiram o tipo segmentado na forma de dentes de serra indo de encontro ao trabalho Boing (2016), afirmando que em durezas próximas a 60 HRC, ocorre o mecanismo de nucleação e propagação da trinca, seguindo de alta deformação plástica nos segmentos entre lamelas, ao encontro de Grzesik (2011), que

ênfatiza a morfologia do cavaco é dependente do mecanismo de formação do cavaco (relação entre endurecimento mecânico e amolecimento térmico). Esses diferentes tipos de cavacos formados mostraram-se compatíveis com as respectivas velocidades de corte empregadas.

No corte interrompido é possível observar comportamento diferente do citado anteriormente, tendo presença de outras formas de cavaco. É apresentado na Figura 60 a morfologia do cavaco em corte interrompido nas velocidades de 60 e 130 m/min, recolhidos antes da fratura da ferramenta.

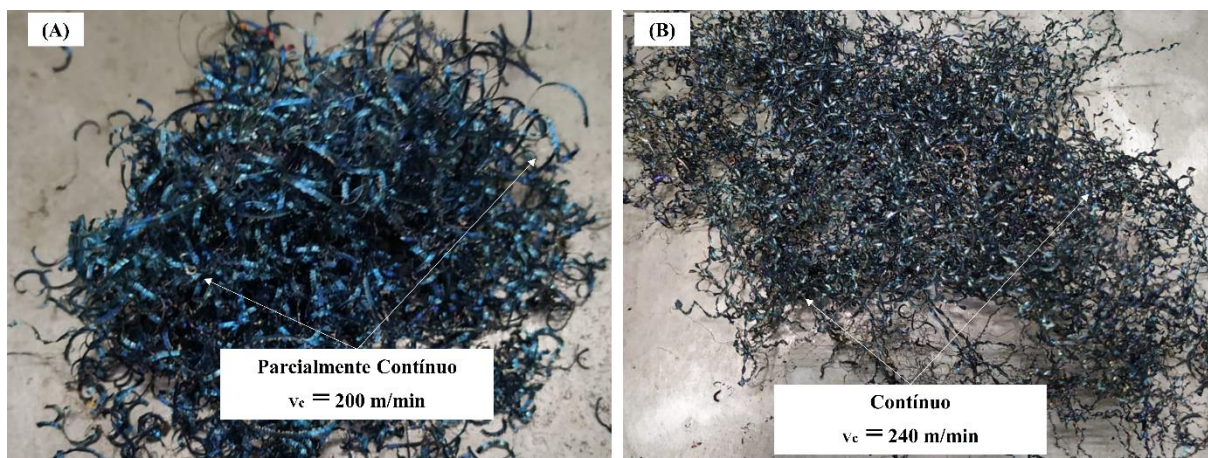
Figura 60 - Morfologia do Cavaco em Corte Interrompido nas Velocidades de Corte de 60 e 130 m/min



Fonte: Elaborado pelo autor

Na velocidade de corte de 60 m/min prevaleceu um cavaco do tipo contínuo de formato fita emaranhado, mesmo tendo os rasgos na face do material, o pequeno percurso entre eles foi capaz de gerar essa morfologia. Já na velocidade de 130 m/min é possível observar um cavaco parcialmente contínuo. É possível notar a coloração em tom azulado nas duas faixas de corte. Na Figura 61 são apresentados os resultados das velocidades de 200 e 240 m/min em corte interrompido.

Figura 61 - Morfologia do Cavaco em Corte Interrompido nas Velocidades de Corte de 200 e 240 m/min



Fonte: Elaborado pelo autor

Na velocidade de corte de 200 m/min observou-se o formato parcialmente contínuo, assim como na $v_c = 130 \text{ m/min}$. Já na velocidade de corte de 240 m/min, houve uma alteração na coloração para acinzentada e seu formato do tipo contínuo, provavelmente ocasionado pela evolução do desgaste da ferramenta, principalmente o desgaste evidente de cratera.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos experimentalmente, conclui-se que para a avaliação do desempenho de uma ferramenta de PCBN no torneamento do aço AISI D2 endurecido em corte contínuo e interrompido que:

- Os desgastes ocorridos no corte contínuo de maiores evidências foram cratera e flanco. Assim como, lascamento e falha catastrófica no corte interrompido. Os mecanismos de desgaste em destaque foram adesão e arrancamento (*attrition*), abrasão e difusão.
- Com o aumento da velocidade de corte observou-se a mudança do mecanismo de desgaste no corte contínuo, passando de *attrition* ($v_c = 60$ m/min) para abrasão e difusão ($v_c = 130, 200$ e 240 m/min), convergindo com as informações disponíveis em literatura.
- O aumento da velocidade de corte resultou no esperado aumento do desgaste da ferramenta. No corte contínuo, a ferramenta apresentou um desempenho mais satisfatório, alcançando 250 mm de comprimento usinado em todas as velocidades de corte selecionadas.
- Na comparação entre as condições de corte, o maior valor medido de $VB_{Bm\acute{a}x}$ foi de 0,61 mm no corte interrompido a 200 m/min. Na mesma faixa e comprimento usinado, foi registrado um valor de 0,09 mm no corte contínuo, o que representa um aumento de 6,7 vezes.
- Na faixa de velocidade de corte de 130 m/min em corte contínuo, foi medida uma rugosidade média (R_a) de 0,416 μm . Esse resultado altamente favorável pode equiparar-se as operações de retificação, tornando viável a substituição desse processo em situações determinadas.
- O desgaste de flanco não resultou em aumento da rugosidade, e, à medida que acontece a sua acomodação ao longo de um determinado tempo de corte, a qualidade superficial melhora.
- A ferramenta não obteve um desempenho satisfatório em velocidades de corte menores (60 m/min), tanto para corte contínuo quanto interrompido, sugerindo um melhor desempenho em valores mais elevados.
- No corte interrompido, as velocidades de corte mais elevadas resultaram em uma vida útil da ferramenta mais longa se comparadas às velocidades menores testadas de 60 m/min e 130 m/min.

- A classe BZN9000 não foi suficientemente tenaz para suportar os impactos causados pelo corte interrompido, não sendo indicado para esse tipo de operação. Por outro lado, para o corte contínuo, a utilização de velocidades mais altas demonstrou resultados positivos em termos de aumento de produtividade.
- Observou-se mudança do mecanismo de desgaste em diferentes velocidades de corte.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A execução deste trabalho possibilitou a apresentação de sugestões para desdobramentos em trabalhos futuros:

- Realizar ensaios variando a profundidade de corte (a_p) e o avanço (f), com o objetivo de avaliar o desempenho da ferramenta.
- Realizar análises das temperaturas de corte.
- Realizar os ensaios com aplicação de fluido de corte, analisando a integridade superficial, forças de corte e vida da ferramenta.
- Realizar ensaios com outros tipos de aços-ferramenta, avaliando as condições de corte interrompido e contínuo com variação de parâmetros.
- Comparar o desempenho de outras ferramentas como cerâmicas e novos revestimentos de metal duro nas condições propostas.
- Investigar os tipos de cavacos (morfologia) nas condições de corte utilizadas, com intuito de compreender os fenômenos envolvidos no processo e correlacioná-los.

REFERÊNCIAS

- ALGARNI, Mohammed. Mechanical Properties and Microstructure Characterization of AISI “D2” and “O1” Cold Work Tool Steels. **Metals**, v. 9, n. 11, p. 1169, 2019.
- ANUPAM, A.; SAURAV, G.; WALEED, B. R.; MARK, P. Prediction of Surface Roughness During Hard Turning of AISI 4340 steel (69 HRC), **Applied Soft Computing**, v. 30, p. 279-286, 2015.
- ANUPAM, Alok; MANAS, Das. Cost-Effective Way Of Hard Turning With Newly Developed HSN2-Coated Tool, **Materials and Manufacturing Processes**, 33:9, 1003-1010, 2018.
- ASAKURA, Kazuma; YAN, Ji Wang. Ultraprecision Micro Grooving On Brass For Surface Wettability Control. In: **Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd.** p. 489-494, 2014.
- ASLANTAS, K; UCUN, I; CICEK, A. Tool Life And Wear Mechanism Of Coated And Uncoated Al₂O₃/TiCN Mixed Ceramic Tools In Turning Hardened Alloy Steel. **Wear Magazine**. Pg. 274-275, 2012.
- ASTAKHOV, V. P. Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance. In: DAVIM, J. D. **Surface Integrity in Machining. Springer**– Verlag London Limited, 2010.
- ASTAKHOV, V. P. Machining of Hard Materials – Definitions and Industrial Applications. In: DAVIM, J. D. **Machining of Hard Materials. Springer**-Verlag London Limited. p. 211, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3685: Ensaio de Vida da Ferramenta de Ponta Única para Torneamento**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 513: Classificação e Aplicação de Metais Duros para a Usinagem com Arestas de Corte Definidas — Designação dos Grupos Principais e Grupos de Aplicação**. Rio de Janeiro, 2013.
- AOUICI, H.; ELBAH, M.; YALLESE, M.A.; FNIDES, B.; MEDDOUR, I.; BENLAHMIDI, S. Performance Comparison Of Wiper And Conventional Ceramic Inserts In Hard Turning of AISI 4140 Steel: Analysis Of Machining Forces And Flank Wear. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, p. 2221 – 2244, 2016.

BOING, Denis. **Transição da Aplicação do Metal-Duro Revestido e do PCBN no Torneamento de Aços Endurecidos em Função da Dureza e do Teor Carbonetos**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

BOING, D.; SCHROETER, R.B.; OLIVEIRA, A.J. Three– Dimensional Wear Parameters and Wear Mechanisms in Turning Hardened Steels with PCBN Tools. **Wear**, v. 398– 399, p. 69–78, 2018.

BORGES, G. C. **Análise da Relação dos Parâmetros de Corte Com a Qualidade Superficial e Desgaste da Ferramenta de Metal Duro com Tripla Camada de Revestimento no Torneamento a Seco do Aço SAE 4140**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande- FURG, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2020.

BOUACHA, K.; YALLESE, M; KHAMEL A.; BELHADI, S. Analysis And Optimization Of Hard Turning Operation Using Cubic Boron Nitride Tool. **Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. Vol. 45, p. 160 -178, 2014.

BUZIO, R.; BORAGNO, C.; BISCARINI, F.; BUATIER DE MONGEOT, F.; VALBUSA, U. The Contact Mechanics of Fractal Surfaces. **Nature materials**, v. 2, n. 4, p. 233-236, 2003.

BUSHLYA, V.; GUTNICHENKO, O.; ZHOU, J; AVDOVIC, P.; STÅHL, J. E. Effects Of Cutting Speed When Turning Age Hardened Inconel 718 With PCBN Tools Of Binderless And Low-CBN Grades. **Machining Science & Technology**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 497–523, 2013.

CORRÊA, Dirley Carlos. **Usinabilidade de Mancais Bimetálicos: Influência do Avanço no Desgaste e na Formação de Rebarbas**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Belo Horizonte, 2002.

BOING, D.; GANEA, A; BROHEDE, U; STÅLNACKE, E; NORGREN, S. The Impact Of The Retained Austenite In The Case-Hardened Steels On The Crater Wear Formation Of The PCBN Tools, **Wear**, Volume 476, 203691, 2021.

DE OLIVEIRA, Adilson José; DINIZ, Anselmo Eduardo; URSOLINO, Davi Janini. Hard Turning In Continuous And Interrupted Cut With PCBN And Whisker-Reinforced Cutting Tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 12-13, p. 5262-5270, 2009.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

DINIZ, A. E.; OLIVEIRA, A. J. D. Hard Turning Of Interrupted Surfaces Using CBN Tools. **Journal of Materials Processing Technology**, 195, 275-281, 2018.

UHLMANN, E.; RIEMER, H.; SCHRÖTER, D.; HENZE, S.; SAMMLER, F.; BARTHELMÄ, F.; FRANK, H. Investigation Of Wear Resistance Of Coated PCBN Turning Tools For Hard Machining, **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 72, p. 270-275, 2018.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 17ª Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2014.

FERREIRA, R.; REHOR, J; LAURO, C.H; CAROU, D; DAVIM, J.P. Analysis Of The Hard Turning Of Aisi H13 Steel With Ceramic Tools Based On Tool Geometry: Surface Roughness, Tool Wear And Their Relation. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 38, p. 2413– 2420, 2016.

KADAM, G. S.; PAWADE, R. S. Surface Integrity And Sustainability Assessment In High-Speed Machining Of Inconel 718 – An Eco-Friendly Green Approach, **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 273-283, 2017.

GGD METALS. **Aço AISI D2**. Disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/produto/aisi-d2/>. Acesso em: 28 de maio 2022.

GRZESIK, W. Mechanics of Cutting and Chip Formation. **Machining of Hard Materials**. Springer, 2011.

GRZESIK, W. Prediction Of Surface Topography In Precision Hard Machining Based On Modelling Of The Generation Mechanisms Resulting From A Variable Feed Rate. **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, v. 94, p. 4115– 4123, 2018.

GRZESIK, W., RECH, J.; ŽAK, K. Characterization Of Surface Textures Generated On Hardened Steel Parts In High-Precision Machining Operations. **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, v. 78, p. 2049–2056, 2015.

GRZESIK, W.; ZAK, K.; KISZKA, P. Comparison Of Surface Textures Generated In Hard Turning And Grinding Operations. **Procedia CIRP**, v. 13, p. 84– 89, 2014.

HENRIK, P.; FILIP, L.; LUIZ, F.; JAN-ERIC, S.; VOLODYMYR, B. Wear Mechanisms Of PCBN Tools When Machining AISI 316L, **Ceramics International**, v. 47, n. 22, p. 31894-31906, 2021.

HOSSEINI, S. B.; BENO, T.; KLEMENT, U; KAMINSKI, J; RYTTBERG, K. Cutting Temperatures During Hard Turning—Measurements And Effects On White Layer Formation In AISI 52100, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 6, p. 1293-1300, 2014.

HÜSEYİN, A. Ç.; ADEM, Ç.; NECATİ, U. The Effects Of Cryomql Conditions On Tool Wear And Surface Integrity In Hard Turning Of AISI 52100 Bearing Steel, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 56, Part A, p. 463-473, 2020.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2. ed. London: Butterworth-Heinemann, 2017.

JEONG, Y.-E., SHIM, D.-S. Microstructure and Mechanical Properties of Fe–4Cr–5Mo–V–6W Powders Hardfaced on AISI D2 Substrate Using Directed Energy Deposition. **Metals and Materials International**, v. 28, n. 11, p. 2621–2636, 2022.

KAYNAK, Y.; LU, T.; JAWAHIR, I.S. Cryogenic Machining-Induced Surface Integrity: A Review And Comparison With Dry, MQL, And Flood-Cooled Machining. **Machining Science and Technology: An International Journal**, v. 18, p. 149-198, 2014.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Springer, 2011.

KLOCKE, F., BRINKSMEIER, E. E WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes, **CIRP Annals- Manufacturing Technology**, v. 54, p. 22-45, 2005.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren**. Springer, v. 547 p., 2008

KUMAR, P.; CHAUHAN, S.R.; PRUNCU, C.I.; GUPTA, M.K.; PIMENOV, D.Y.; MIA, M.; GILL, H.S. Influence of Different Grades of CBN Inserts on Cutting Force and Surface Roughness of AISI H13 Die Tool Steel during Hard Turning Operation. **Materials**, v. 12, n. 177, p., 2019.

KUMAR, C.S.; PATEL, S.K. Application of surface modification techniques during hard turning: Present Work and Future Prospects. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, v. 76, p. 112– 127, 2018.

LIMA, F. D. F. **Estudo do Desgaste de Ferramentas de Metal Duro e Cerâmicas no Torneamento do Inconel® 751 e Inconel® 718**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012.

LINHU TANG, YONGJI SUN, BAODONG LI, JIANCHENG SHEN, GUOLIANG MENG, Wear Performance And Mechanisms Of PCBN Tool In Dry Hard Turning Of AISI D2 Hardened steel, **Tribology International**, v 132, 2019, p. 228-236, 2019.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da Usinagem dos Materiais**.3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MACHADO, Á.R.; DINIZ, A.E. Tool Wear Analysis In The Machining Of Hardened Steels. **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, v.92, p. 4095–4109, 2017.

MLFREE. **Automatic-Transmission-01-E1447966652834**, 2017. Disponível em: < <https://mlfree.com/en/how-automatic-transmissions-came-about/automatic-transmission-01-e1447966652834/> >. Acesso em: 18 ago. 2021.

MONDAL, K.; DAS, S.; MANDAL, B.; SARKAR, D. An Investigation On Turning Hardened Steel Using Different Tool Inserts. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 31, n. 13, p. 1770-1781, 2016.

JAHAN, M.P., RAHMAN, M., WONG, Y.S. Micro-Electrical Discharge Machining (Micro-EDM): Processes, Varieties, and Applications, **Comprehensive Materials Processing, Elsevier**, p. 333-371, 2014.

KARTHIK, M. S.; RAJU, V. R.; NIRANJAN, R. K.; BALASHANMUGAM, N.; SANKAR, M.R., Cutting Parameters Optimization For Surface Roughness During Dry Hard Turning Of EN 31 Bearing Steel Using CBN Insert, **Materials Today: Proceedings**, v. 26, Part 2, p. 1119-1125, 2020.

NABIL, Jouini; REVEL, Philippe; GUILLAUME, Thoquenne, Influence Of Surface Integrity On Fatigue Life Of Bearing Rings Finished By Precision Hard Turning And Grinding, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 57, p. 444-451, 2020.

NAWAZ, Yasir; SHAHID Maqsood; KHAWAR Naeem; RASHID Nawaz; MUHAMMAD Omair, TUFAIL, Habib. Parametric Optimization Of Material Removal Rate, Surface Roughness, And Kerf Width In High-Speed Wire Electric Discharge Machining (Hs-Wedm) Of Dc53 Die Steel. **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, v.107, p. 3231–3245, 2020.

GUTNICHENKO, O.; NILSSON, M.; LINDVALL, R.; BUSHLYA, V.; ANDERSSON, M.; Improvement Of Tool Utilization When Hard Turning With CBN Tools At Varying Process Parameters, **Wear**, v. 477, 203900, 2021.

PARRA, B. S.; GENNARI, R. C.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Rugosidade Superficial de Revestimentos Cerâmicos. **Revista Cerâmica Industrial**, Março-Abril, 2006.

PEREIRA, V.P. **Análise da Temperatura Ótima de Corte Para o Par: Metal Duro Revestido vs. Aço ABNT 1045**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019.

REVEL, Philippe; NABIL, Jouini; GUILLAUME, Thoquenne; FABIEN, Lefebvre. High Precision Hard Turning Of AISI 52100 Bearing Steel, **Precision Engineering**, v. 43, p. 24-33, 2016.

POLLY, M. S. **Análise Comparativa de Ferramentas de Metal-Duro Classe S e Cerâmica Mista no Torneamento a Seco e com MQL do Aço SAE 4340 Endurecido**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019.

RATNAM, M. Factors Affecting Surface Roughness in Finish Turning. **Comprehensive Materials Finishing**, Elsevier, p.1-25, 2017.

REIS, B.C.M.; PEREIRA, N.F.S.; SANTOS, A.J.; CÂMARA, M.A.; FARIA, P.E.; RODRIGUES, P.C.M.; RU-BIO, J.C.C. Influência do Material da Ferramenta de Corte Sobre a Usinabilidade do Aço ABNT 4340 no Torneamento. **Revista Matéria**, v. 24, n.1, 2019.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora, v. 246, 2007.

KHAN, Sarmad Ali; UMAR, Muhammad; SALEEM, Muhammad Qaiser; MUFTI, Nadeem Ahmad; RAZA, Syed Farhan. Experimental Investigations On Wiper Inserts' Edge Preparation, Workpiece Hardness And Operating Parameters In Hard Turning Of AISI D2 Steel, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 34, Part A, p. 187-196, 2018.

KHAN, Sarmad Ali; ANWAR, Saqib; ISHFAQ, Kashif; AFZAL, Muhammad Zubair; AHMAD, Shafiq; SALEH, Mustafa. Wear Performance of Modified Inserts in Hard Turning of AISI D2 Steel: A Concept of One-Step Sustainable Machining, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 60, p. 457-469, 2020.

AREFIN, Shamsul; A, Xinquan Zhang; KUMAR, Senthil; NEO, Dennis Wee Keong; WANG, Yang. Study Of Chip Formation Mechanism In One-Dimensional Vibration-Assisted Machining, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 291, 117022, 2021.

SIDDHPURA, A.; PAUROBALLY, R. A Review Of Flank Wear Prediction Methods For Tool Condition Monitoring In A Turning Process. **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, v.65, p. 371– 393, 2013.

SOBIYI, K.; SIGALAS, I.; AKDOGAN, G.; TURAN, Y. Performance Of Mixed Ceramics And CBN Tools During Hard Turning Of Martensitic Stainless Steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, p. 861–871, 2015.

SOUZA, DOUGLAS MACIEL D'AURIOL. **Análise das Forças e do Desgaste de Flanco em Ferramentas de Metal duro Modificadas no Torneamento do Aço ABNT 1045**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

SLIPCHENKO, K.; BUSHLYA, V.; STRATIICHUK, D.; PETRUSHA, I.; CAN, A.; TURKEVICH, V.; STÅHL, J. E.; LENRICK, F. Multicomponent Binders For Pcbn Performance Enhancement In Cutting Tool Applications. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 42, n. 11, p. 4513-4527, 2022.

STEPHENSON, D. A. J. S. A. **Metal Cutting Theory and Practice**. [S.l.]: [s.n.], v. 3. 956 p., 2016.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Coolants And Lubricants BT - Metal Cutting (Fourth Edition)**. [S.l.]: [s.n.], 311–337 p., 2000.

VILLARES METALS. **Aço Ferramenta para Trabalho a Frio VD2**. Disponível em: <https://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VD2>. Acesso em: 28 maio 2022.

VOLODYMYR, Bushlya, FILIP Lenrick, AXEL Bjerke, HISHAM Aboulfadl, MATTIAS Thuvander, JAN-ERIC Ståhl, RACHID M'saoubi. Tool Wear Mechanisms Of PCBN In Machining Inconel 718: Analysis Across Multiple Length Scale, **CIRP Annals**, v. 70, n. 1, p. 73-78, 2021.

WANG, D.; XUE, C.; CAO, Y.; ZHAO, J. Fabrication And Cutting Performance Of An Al₂O₃/Tic/Tin Ceramic Cutting Tool In Turning Of An Ultra-High-Strength Steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, p. 1967–1976, 2017.

YASUO, Yamane; TANAKA, Ryutaro; SUGINO, Tadanori; ISRAEL, Martinez Ramirez; YAMADA, Keiji; A New Quantitative Evaluation For Characteristic Of Surface Roughness In Turning, **Precision Engineering**, v. 50, p. 20-26, 2017.

YOUSEFI, Sasan; ZOHOOR, Mehdi. Effect Of Cutting Parameters On The Dimensional Accuracy And Surface Finish In The Hard Turning Of MDN250 Steel With Cubic Boron Nitride Tool, For Developing A Knowledge Base Expert System. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 14, p. 1-13, 2019.

ZHAO, T.; ZHOU, J.M.; BUSHLYA, V.; STAHL, J.E. Effect Of Cutting Edge Radius On Surface Roughness And Tool Wear In Hard Turning Of AISI 52100 Steel. **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, v. 91, p. 3611– 3618, 2017.