

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DAS CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

ÉVERTON CELESTINO VARELA

**VIDA ÚTIL DE FERRAMENTAS NO TORNEAMENTO LONGITUDINAL DE AÇO
ASTM 4140 TEMPERADO E CROMADO**

CAXIAS DO SUL

2021

ÉVERTON CELESTINO VARELA

**VIDA ÚTIL DE FERRAMENTAS NO TORNEAMENTO LONGITUDINAL DE AÇO
ASTM 4140 TEMPERADO E CROMADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
para o recebimento do Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador Prof.: Dr. Rodrigo Panosso
Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2021

ÉVERTON CELESTINO VARELA

**VIDA ÚTIL DE FERRAMENTAS NO TORNEAMENTO LONGITUDINAL DE AÇO
ASTM 4140 TEMPERADO E CROMADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
para o recebimento do Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Aprovado em 13 de Julho de 2021.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Rafael Dallegrave Conrado
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais, Lorival e Eliane, que me acompanharam por todo o período de estudos e sempre me apoiaram nas escolhas profissionais, acadêmicas e pessoais.

Ao irmão Émerson, minha irmã Priscila e minha avó Delia que também estiveram ao meu lado incentivando e me animando nos dias trabalhosos e exaustivos.

À minha noiva Franciele pela inspiração, apoio, e paciência principalmente no final desta da jornada acadêmica.

A todos os amigos que de uma forma ou outra estiveram sempre disponíveis quando precisei de ajuda.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por mais esta conquista.

Ao professor Dr. Rodrigo Panosso responsável pela orientação deste trabalho, que com profissionalismo e muita paciência me conduziu até a conclusão desta importante etapa da minha jornada acadêmica.

Aos alunos, professores, técnicos, funcionários e todo Departamento da Área do Conhecimento das Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul, que sempre me ajudaram quando necessário.

A empresa Ognibene Hidrostática LTDA por ter me auxiliado em todos os semestres cursados. Por ter disponibilizado recursos e demais condições para realização dos experimentos e estudos necessários para conclusão deste trabalho.

A empresa Feedtools Walter na pessoa do Sr. Eduardo pelo auxílio nas indicações de referências e pessoas para ajudar nas pesquisas e orientações.

Ao Dr. Sander Gabaldo pela grande contribuição com referências bibliográficas, e pela disponibilidade em auxiliar no que fosse necessário.

A empresa TGSul Sumitomo na pessoa do Sr. Jonatan pelo fornecimento de ferramentas, literaturas. Também pela disponibilidade em esclarecer dúvidas e instruir com alternativas de métodos de utilização dos insertos.

RESUMO

A produção de cilindros hidráulicos aplicados na indústria automobilística tem como um dos seus principais componentes a fabricação de hastes usinadas. Por serem itens de segurança e com necessidade de atenderem propriedades mecânicas específicas, grande parte desses itens são produzidos com aços endurecidos, além de sofrerem processo de cromagem a fim de aumentar dureza superficial e garantir resistência a corrosão. Assim, gerou-se a necessidade de evolução dos processos de usinagem para remoção de material endurecido, pois a baixa usinabilidade afeta diretamente os custos de produção destes componentes, tornando-os caros e muitas vezes inviáveis. O objetivo deste trabalho é contribuir para o estudo da usinagem de aço ASTM 4140 temperado e cromado, por meio do torneamento longitudinal utilizando ferramentas de corte. Foram testadas duas ferramentas de corte, sendo a primeira de Metal Duro e a segunda de cerâmica, com o propósito de obter o melhor desempenho em termos de vida da ferramenta e tempo de produção, além de identificar os mecanismos de desgaste envolvidos nas operações. Como limitador do teste, foram utilizados critérios de medição de desgaste máximo variando entre 0,2 mm para ferramenta de Metal Duro e 0,3 mm para ferramenta de cerâmica. A vida útil em minutos foi monitorada e analisada com a finalidade de encontrar as melhores possibilidades para a operação de usinagem. Os mecanismos de desgaste foram observados em todos os testes. A ferramenta de cerâmica apresentou vida útil 36,3% maior e aumento de 82% na quantidade de peças, em comparação com a ferramenta de Metal duro. O tempo de usinagem utilizando inserto de cerâmica reduziu 49,56%. Os custos totais de produção calculados para o melhor resultado dos testes com a ferramenta de cerâmica são menores do que para o melhor resultado obtido com a ferramenta de metal duro, desde que o custo da ferramenta não exceda 2,11 vezes o custo da ferramenta. Mantendo essa relação de custo dentro desta faixa de proporcionalidade, o inserto de cerâmica foi indicado para aplicação no processo produtivo.

Palavras-Chave: Usinagem, Torneamento, Aços endurecidos, Metal Duro, Cerâmica

ABSTRACT

The production of hydraulic cylinders Applied in the automobile industry, has as its main components the manufacture of machined rods. As they are safety items, and in need of meeting specific mechanical properties, most of these items are produced with hardened steels, in addition to undergoing a chrome plating process in order to increase surface hardness and ensure corrosion resistance. Thus, the necessity of the evolution of the machining processes to remove hardened material, as low machinability directly affects the production costs of these components, making them expensive and often impracticable. The objective of this work is to contribute to the main study of machining of tempered and chromed ASTM 4140 steel, through longitudinal turning using cutting tools. Two cutting tools were tested, the first being Carbide and the second ceramic, in order to obtain the best performance in terms of tool life and production time, in addition to identifying the wear measurement criteria ranging from 0.2 mm for carbide tool to 0.3 mm for ceramic tool were observed in all tests. The best results were obtained when machining with the ceramic tool. The ceramic tool had a 36,3% longer tool life and a 82% increase in the number of parts compared to the Carbide tool. Machining time using ceramic inserts reduced 49,56%. The total production costs calculated for the best result of the tests with the ceramic tool are lower than for the best result obtained with the carbide tool, as long as the tool cost does not exceed 2.11 times the tool cost. Keeping this cost ratio within this proportionality range, the ceramic insert was indicated for application in the production process.

Key Words: Machining, Turning, Hardened steels, Carbide, Ceramics

LISTA DE SÍMBOLOS

A	ampere
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
a_p	Profundidade ou largura de usinagem
D	Diâmetro
f	Avanço
KB	Largura de cratera
kg	Quilograma
KM	Distância do centro à aresta de corte
KT	Desgaste de cratera
kW	Quilowatt
L	Comprimento
m	Metro
min	Minuto
mm	Milímetros
N	Nitrogênio
n	RPM
pg	Página
T_c	Tempo de Corte
TiC	Carboneto de titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
TiO_2	Dióxido de titânio
VB	Desgaste de Flanco
V_{Bmax}	Largura máxima do desgaste de flanco
V_c	Velocidade de Corte
V_f	Movimento de avanço
V_e	Movimento efetivo de corte
WC	Carboneto de Tungstênio
ZrO_2	Dióxido de Zircônio

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de testes e materiais)
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e Aço)
C	Carbono
Co	Cobalto
Cr	Cromo
CE	Cerâmica
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i> (Deposição Química de Vapor)
<i>et. al.</i>	E outros
GPC	Gume Postiço de Corte
HB	<i>Hardness Brinell</i> (Dureza Brinell)
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i> (Dureza Rockwell C)
HV	<i>Hardness Vickers</i> (Dureza Vickers)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
MD	Metal Duro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Mpa	MegaPascal
OHL	Ognibene Hidrostática Ltda.
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i> (Deposição Física de Vapor)
RPM	Rotações Por Minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros Automotivos)
S	Enxofre
Si	Silício
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Movimentos de Corte de Torneamento.....	18
Figura 2.2 – Características básicas dos materiais de ferramentas.....	20
Figura 2.3 – Coberturas de Metais Duros.....	23
Figura 2.4 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta em relação ao tempo.....	25
Figura 2.5 - Mecanismos de desgaste.....	26
Figura 2.6 - Desgaste Abrasivo em ferramentas de PCBN após usinar aço ABNT 5140.....	27
Figura 2.7 - Gume Posição de Corte	29
Figura 2.8 - Variação do desgaste da superfície de folga da ferramenta em função da velocidade de corte, para um de usinagem constante.	29
Figura 2.9 - Desgaste de entalhe na aresta da ferramenta	30
Figura 2.10 - Parâmetros utilizados para medir o desgaste	32
Figura 2.11 - Usinabilidade dos aços Cromax.....	33
Figura 2.12 - Evolução do desgaste de flanco (VB) em função do tempo de corte para diferentes combinações de parâmetros de corte.	34
Figura 3.13 - Lupa com escala de medição	37
Figura 3.14 - Esteroscópio Trinocular.....	38
Figura 3.15 - Corpo de Prova posicionado para usinagem.....	39
Figura 3.16 - Geometria de insertos W.....	40
Figura 4.17 - Evolução dos desgastes com Metal Duro	45
Figura 4.18 - Evolução dos desgastes com Cerâmica	46
Figura 4.19 - Desgastes dos testes T1 e T2 da Ferramenta 1	48
Figura 4.20 - Desgastes dos testes T3 e T4 da Ferramenta 1	49
Figura 4.21 - Desgastes dos testes T5 e T6 da Ferramenta 2	49
Figura 4.22 - Desgastes dos testes T7 e T8 da Ferramenta 2	50
Figura 4.23 - Vida das Ferramentas.....	51
Figura 4.24 - Tempos de Usinagem por ano em cada teste.....	53
Figura 4.25 - Custos proporcionais totais para cada teste	55
Figura 4.26 - Custo Total com valor de cerâmica 2,11 vezes maior do que Metal Duro.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise Química do aço Cromax 42CrMo4 em percentual da estrutura.....	38
Tabela 2 - Parâmetros Recomendados para a Ferramenta 1.....	40
Tabela 3 - Informações sobre a geometria da Ferramenta 1.....	41
Tabela 4 - Parâmetros Recomendados para a Ferramenta 2.....	42
Tabela 5 - Proposta de Testes para Usinagem.....	44
Tabela 6 - Tempos de Usinagem por peça	52
Tabela 7 - Estimativa anual de tempos na aplicação dos testes.....	53
Tabela 8 - Custos proporcionais envolvidos em cada tese	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVO GERAL	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	MATERIAIS E TRATAMENTOS.....	17
2.2	PROCESSO DE FABRICAÇÃO POR USINAGEM	17
2.2.1	Torneamento	17
2.2.2	Movimentos e relações geométricas no torneamento	18
2.2.2.1	Velocidade de corte e de avanço.....	18
2.2.2.2	Tempo de corte.....	19
2.2.2.3	Profundidade de usinagem	20
2.2.3	Ferramentas de corte.....	20
2.2.3.1	Metal Duro	21
2.2.3.2	Classes e seleção do metal duro para aços endurecidos.....	21
2.2.3.2.1	<i>Carboneto de Titânio (TiC) e Carbonitrero de titânio (TiCN)</i>	22
2.2.3.2.2	<i>Óxidos de alumínio (AL2O3)</i>	22
2.2.3.2.3	<i>Nitreto de Titânio (TiN)</i>	23
2.2.3.3	Cerâmicas	23
2.3	USINABILIDADE E VIDA DA FERRAMENTA	24
2.3.1	Mecanismos de desgaste	25
2.3.1.1	Desgaste por abrasão mecânica.....	26
2.3.1.2	Desgaste por Aderência.....	27
2.3.1.3	Desgaste por Difusão	27
2.3.1.4	Desgaste por Oxidação.....	28

2.3.2	Tipos de desgaste	28
2.3.2.1	Gume Posição de Corte (GPC)	28
2.3.2.2	Desgaste Frontal.....	30
2.3.2.3	Desgaste de entalhe	30
2.3.2.4	Lascamento	31
2.3.2.5	Trincas.....	31
2.3.2.6	Quebras	31
2.3.3	Medição dos desgastes de ferramenta.....	31
2.3.4	Estudos de torneamento de aços endurecidos	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	CONDIÇÕES DE USINAGEM	36
3.2	EQUIPAMENTOS.....	37
3.2.1	Máquina ferramenta	37
3.2.2	Lupa com escala de Medição	37
3.2.3	Esteroscópio Trinocular	38
3.3	MATERIAIS	38
3.3.1	Corpos de Prova	38
3.3.2	Dispositivos de fixação para usinagem.....	39
3.3.3	Ferramentas de Corte.....	39
3.3.3.1	Ferramenta 1	40
3.3.3.2	Ferramenta 2.....	41
3.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1	EVOLUÇÃO DOS DESGASTES	45
4.2	MECANISMOS DE DESGASTES	47
4.3	VIDA DAS FERRAMENTAS.....	51

4.4	TEMPOS E CUSTOS DE USINAGEM.....	52
4.5	CONCLUSÕES FINAIS.....	56
4.6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	58
	ANEXO 1.....	60

1 INTRODUÇÃO

Conforme Groover (1987), os processos mais importantes em categoria de usinagem são torneamento, furação e fresamento. Essas operações são realizadas utilizando ferramentas de corte que são mais duras e resistentes do que o material trabalhado. Os processos de tratamentos térmicos são aplicados para melhorar as propriedades mecânicas ou físicas do material de trabalho. Para Rebeyka (2016), torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas. A peça rotaciona em torno de um eixo principal, enquanto a ferramenta é deslocada ao mesmo tempo em uma trajetória coplanar com referência no eixo. As máquinas mais utilizadas atualmente para esse processo são equipadas com Comando Numérico Computadorizado (CNC).

O trabalho foi desenvolvido na empresa Ognibene Hidrostática Ltda (OHL), que atua no ramo metalúrgico, com fabricação e montagem de atuadores hidráulicos e seus componentes. Os produtos são aplicados em máquinas agrícolas, fornecidos para clientes nacionais que atuam no ramo automotivo, com destaque para John Deere, AGCO, CNH e ZF, sendo esses os clientes mais representativos.

Dentre os principais componentes dos atuadores hidráulicos, as hastes usinadas representam um valor significativo de custo devido ao seu volume e composição de material, além do tempo de produção. Um dos materiais utilizados para produção dessas peças é o Cromax 42CrMo4, do fornecedor OVAKO, equivalente ao SAE/ASTM 4140, temperado e cromado.

Operações de torneamento em aços temperados e cromados apresentam desafios para a indústria metal mecânica em geral. A dificuldade de se obter um bom rendimento das ferramentas de usinagem é limitadora para uma maior produtividade dos processos. Foi proposto um estudo analisando as condições atuais de usinagem das hastes, com a utilização de ferramentas de corte insertadas, comparando com uma aplicação de outra ferramenta alternativa.

Foram testadas essas 2 opções de ferramentas, com variações de parâmetros de corte, afim de que possam ser analisadas e, em seguida, ser evidenciada qual condição apresentará os melhores resultados de vida útil da ferramenta, para constituir as informações conclusivas e indicar qual a melhor opção a ser aplicada no processo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) se concentrou no processo de fabricação por usinagem, pelo método de torneamento longitudinal com máquinas CNC.

A pesquisa e desenvolvimento de métodos e processos de torneamento foi importante para compreender as principais características que envolvem o produto estudado, com a definição de opções e métodos que podem ser aplicados na usinagem. Além de apresentar opções utilizadas nas literaturas de referência, testes de usinagem foram realizados com variações de parâmetros de corte, afim de comparar os desgastes e vida útil das ferramentas. A ferramenta que apresentou melhores resultados foi sugerida como melhoria de processo, reduzindo custos e tempos de produção.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar comparativamente a vida útil de duas opções de ferramentas de usinagem no processo de torneamento longitudinal em superfície de aço ASTM 4140 temperada e cromada.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir condições de usinagem com variações de parâmetros de corte para as duas ferramentas de teste.
- Avaliar desgastes conforme critérios a serem determinados
- Registrar vida útil de usinagem em cada troca de ferramentas
- Comparar desgastes e vida útil nas diferentes aplicações
- Calcular a redução de custos e de tempos de produção
- Apresentar resultados indicando as opções mais satisfatórias

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS E TRATAMENTOS

Nas designações da Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE – *Society of Automotive Engineers*) e Sociedade Americana para Ensaio e Materiais (ASTM – *American Society for testing and Materials*), o aço 4140 é uma liga metálica de ferro com faixas de 0,4% de cromo e 0,08% a 0,35% de Molibdênio. Na classificação alemã de normas DIN, o material equivalente é o 42CrMo4 com teor de carbono de 0,42% (CHIAVERINI, 2008). É considerado aço de médio carbono e aplicado onde há a necessidade de alta resistência mecânica, com uma combinação elevada de resistência à abrasão e tenacidade (CHALLISTER, 2002).

Em hastes utilizadas como componentes em atuadores hidráulicos do setor automobilístico é comum a aplicação de material com o médio teor de carbono submetido ao processo de têmpera superficial, recomendado para aços endurecíveis. Na técnica de indução eletromagnética, onde uma corrente alternada flui por meio de um indutor ou bobina de trabalho, é estabelecido um campo magnético altamente concentrado na peça, que devido ao fluxo controlado de corrente com a voltagem induzida, endurece a superfície da haste até uma espessura limitada. Após a têmpera superficial, as peças são revenidas para alívio de tensões (CHIAVERINI, 2008).

Pelo fato de ficarem expostas ao ambiente externo de sua aplicação, as hastes de cilindros hidráulicos, feitas de aço, devem ser submetidas a um tratamento de proteção à corrosão. Essa proteção geralmente é realizada criando uma película protetora na superfície do material, protegendo o produto base do meio corrosivo. Essa película pode ser criada artificialmente mediante depósito de outra substância na superfície do metal, ou naturalmente pela produção espontânea de película superficial, por meio da formação de composto químico, resultante da reação de elementos de liga introduzidos no metal. O processo de cromagem é o mais eficiente, para a maioria das condições, quando os teores estão acima de 10% (CHIAVERINI, 2008).

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO POR USINAGEM

2.2.1 Torneamento

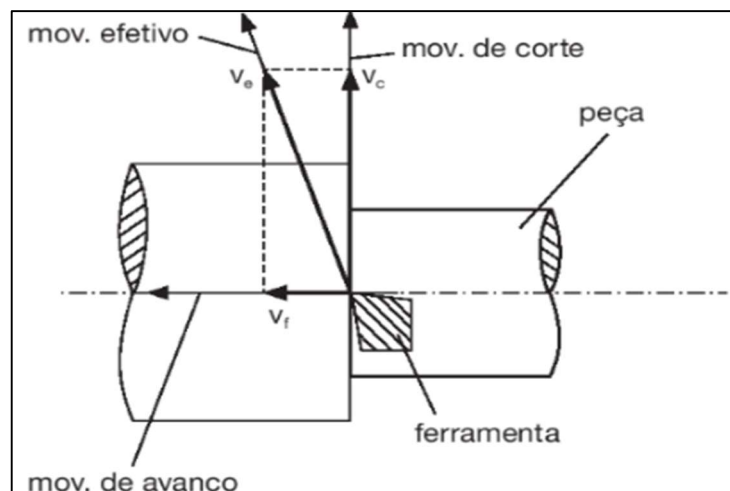
Para Groover (1987), torneamento é um processo de usinagem no qual uma ferramenta monocortante remove o material de uma peça em rotação. Esse processo visa à obtenção de superfícies cilíndricas, onde o material de trabalho é rotacionado no mandril de um torno. A ferramenta é mantida rígida e deslocada em uma taxa constante ao longo do eixo, cortando uma camada do material para formar a geometria cilíndrica desejada ou uma superfície de perfil mais complexo (TRENT, 1991).

As operações de torneamento permitem que seja realizada uma grande quantidade de detalhes nas peças cilíndricas, dentre as quais estão inclusas as operações de torneamento cilíndrico externo e interno, também conhecidas como torneamento longitudinal.

2.2.2 Movimentos e relações geométricas no torneamento

Conforme Ferraresi (1970), os três principais movimentos ativos que resultam na remoção de cavacos são os de velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_f) e efetivo (V_e). Sendo cada um deles representado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Movimentos de Corte de Torneamento



Fonte: REBEYKA (2016)

2.2.2.1 Velocidade de corte e de avanço

Para Diniz *et al.* (2010, pg 17), “a velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça”, para operações como o torneamento, “onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente”.

Conforme Rebeyka (2016), em máquinas que tenham movimento de rotação, a velocidade de corte se relaciona com o número de rotações da peça, conforme a equação:

$$n = \frac{1000 \times V_c}{D \cdot \pi} \quad (1)$$

Onde:

n = número de rotações, geralmente sendo por minuto (RPM)

1000 = constante de conversão de m (metro) para mm (milímetro)

V_c = velocidade de corte (m/min)

D = Diâmetro (mm)

$\pi = 3,14159265$

A velocidade de corte é fornecida por tabelas que relacionam o tipo de operação com o material envolvido. Os principais fatores que determinam a velocidade de corte são o tipo de material da peça, ferramenta, operação a ser realizada, condições de refrigeração, estabilidade da máquina e fixação da peça (REBEYKA, 2016).

Conforme Diniz *et al.* (2010), a velocidade de corte (V_c), para as operações de torneamento pode ser calculada reorganizando a equação que foi citada anteriormente, resultando em:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad (2)$$

Para Ferraresi (1970, pg 5), “a velocidade de avanço (V_f) é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido do avanço”. Conforme Diniz *et al.* (2010), em operações de torneamento é o produto do avanço (f) pela rotação da ferramenta. Equação dada por:

$$V_f = f \cdot n \quad (3)$$

2.2.2.2 Tempo de corte

Nos processos, onde é constante a velocidade de avanço, pode ser calculado o tempo de corte pela equação cinemática a seguir:

$$t_c = \frac{L}{V_f} \quad (4)$$

Onde:

t_c = tempo de corte (min)

L = comprimento de corte (mm)

V_f = velocidade de avanço (mm/min)

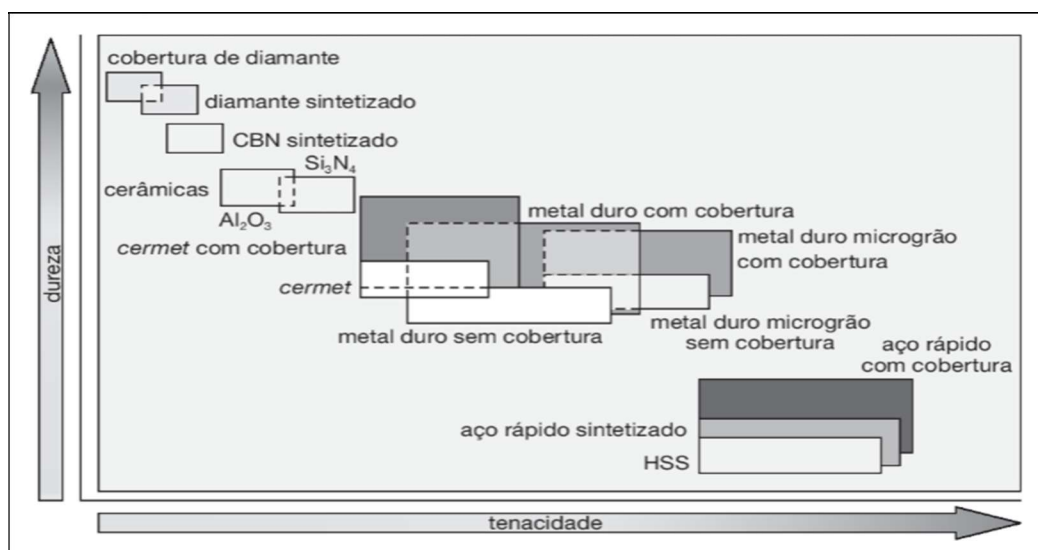
2.2.2.3 Profundidade de usinagem

Grandezas de penetração descrevem geometricamente o quanto uma ferramenta se aprofunda na peça. A profundidade ou largura de usinagem (a_p) é definida como a “profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho” (DINIZ *et al.*, 2010 pg. 21).

2.2.3 Ferramentas de corte

A usinagem é realizada por meio da ação da ferramenta de corte. Na Figura 2.2 são apresentados os principais materiais empregados na fabricação de ferramentas de corte, com um comparativo entre tenacidade e dureza (REBEYKA, 2016).

Figura 2.2 – Características básicas dos materiais de ferramentas



Fonte: REBEYKA (2016)

As ferramentas de corte podem ser fabricadas em diversos materiais, sendo que dois dos principais utilizados no torneamento de aços com superfície endurecida são o metal duro e cerâmica (REBEYKA, 2016).

2.2.3.1 Metal Duro

É o material mais utilizado em ferramentas de usinagem, devido à combinação de dureza em temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade (FERRARESI, 1970). Para Diniz *et al.* (2010), “o metal duro é um produto da metalurgia do pó, feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência a compressão”.

Essencialmente, o metal duro é formado por carbonetos extremamente duros e elemento aglomerante. O principal componente é o carboneto de tungstênio (WC), caracterizado por elevada dureza e resistência ao desgaste, enquanto que o principal elemento de liga, ou aglomerante, é o cobalto (Co), que aumenta a tenacidade do material (FERRARESI, 1970).

2.2.3.2 Classes e seleção do metal duro para aços endurecidos

Conforme citado por Diniz *et al.* (2010), os diversos tipos de metal duro são classificados por letras com subdivisões dentro de cada grupo utilizando números. As classes que podem ser aplicadas na usinagem dos aços endurecidos são principalmente a M, S e H. Dependendo da aplicação desejada, três critérios principais definem qual tipo de ferramenta deve ser escolhida para obter melhor desempenho, sendo:

- Tipo de operação de usinagem: Diniz *et al.* (2010) cita que operações com profundidade de usinagem e avanços elevados (desbaste) exigem emprego de classes com maior tenacidade (maior teor de Co).
- Velocidade de corte: para Ferraresi (1970), “a temperatura que se desenvolve na aresta de corte, à medida que aumenta, exige classe de maior resistência ao calor, portanto com menor teor de cobalto”.
- Condições de máquina-ferramenta: se o sistema de fixação não for rígido o suficiente e houver tendência à vibração, é necessária uma classe mais tenaz (DINIZ *et al.*, 2010).

O desenvolvimento de carbonetos revestidos por volta de 1970 representou um avanço significativo na tecnologia de ferramentas de corte. A primeira camada aplicada à base do WC-Co é geralmente TiN ou TiCN devido à boa adesão e coeficiente de expansão térmica semelhante. Camadas adicionais de várias combinações são subsequentemente aplicadas. Carbonetos revestidos são empregados em altas velocidades para aços, em situações em que a força dinâmica e o choque térmico são mínimos (GROOVER, 1987).

Diniz *et al.*, (2010) menciona que “a finalidade principal das camadas de revestimento é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e a peça”, sendo que o interior na pastilha ainda mantém as características de tenacidade do metal duro simples (WC + Co), aumentando assim em muitos casos a vida da ferramenta e a diminuição dos esforços de corte.

Os materiais mais utilizados para coberturas são o carboneto de titânio (TiC), o óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN) e o carbonitreto de titânio (TiCN). Cada uma dessas camadas, com suas principais características, é descrita a seguir.

2.2.3.2.1 Carboneto de Titânio (TiC) e Carbonitreto de titânio (TiCN)

Possuem excelente resistência ao desgaste por abrasão, além de promover a adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo. A dureza da camada TiC é da ordem 3000 HV, maior do que a dureza das outras coberturas. Apresenta também baixa tendência de soldagem com o material da peça, dificultando desgaste por abrasão e a formação da aresta postiça de corte, além de baixo coeficiente de dilatação térmica. O carbonitreto de titânio (TiCN) tem propriedades semelhantes, porém com coeficiente de atrito mais baixo em relação ao TiC. Tanto TiC quanto o TiCN necessitam de barreira térmica devido ao carbono, para que seja evitado desgaste de difusão. O óxido de alumínio é utilizado com uma segunda camada em vários casos sobre essas coberturas (DINIZ *et al.*, 2010).

2.2.3.2.2 Óxidos de alumínio (Al_2O_3)

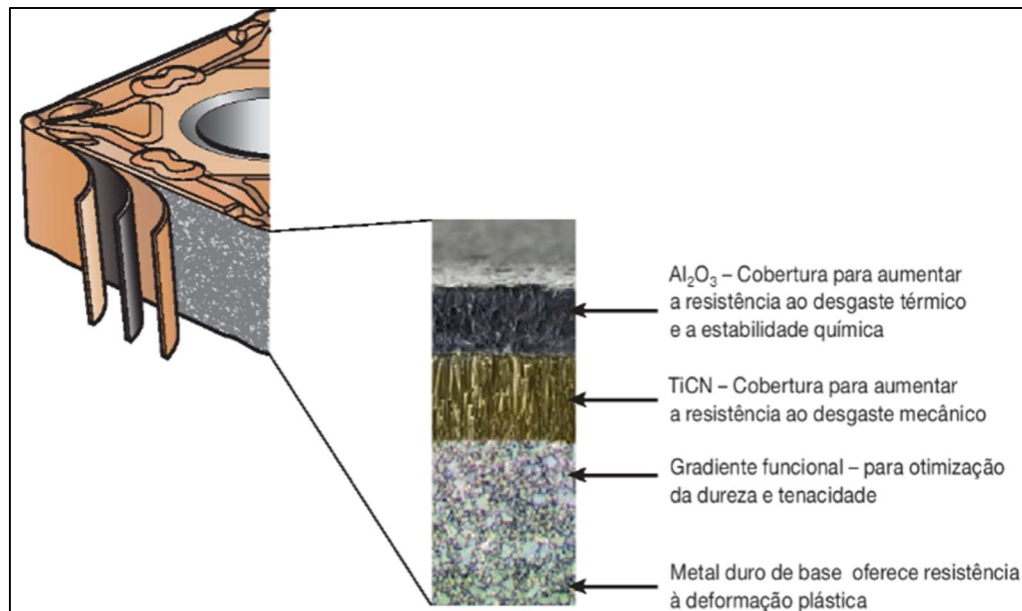
Em temperaturas elevadas, a ligação química garante estabilidade térmica por ser um material cerâmico refratário, possuindo, portanto, baixa condutividade térmica e elevada dureza a quente, além de possuir elevada resistência ao desgaste por abrasão, à oxidação e estabilidade química na presença do ferro. Nas ferramentas de metal duro revestido, diminui

significativamente a tendência de formação de desgaste de cratera. Em contrapartida, possui baixa resistência a choques mecânicos e térmicos (DINIZ *et al.*, 2010).

2.2.3.2.3 Nitreto de Titânio (TiN)

Conforme Diniz *et al.*, (2010), o TiN “reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC, ou seja, tem menor tendência a difusão com aços”. A Figura 2.3 ilustra as camadas das coberturas de metal duro.

Figura 2.3 – Coberturas de Metais Duros



Fonte: REBEYKA (2016) apud Sandvik Coromant

As ferramentas de metal duro com cobertura combinam dureza, estabilidade química, tenacidade e resistência ao desgaste. As coberturas podem ser aplicadas pelos métodos PVD (Deposição Física de Vapor) e CVD (Deposição Química de Vapor).

2.2.3.3 CERÂMICAS

As ferramentas de corte de cerâmica são compostas principalmente por óxidos de alumínio com granulação fina (Al₂O₃), prensado e sinterizado em altas pressões e temperaturas sem aglutinante na pastilha (GROOVER, 1987). Segundo Ferraresi (1970), “o característico

fundamental do metal cerâmico é sua resistência ao amolecimento pelo calor às altas temperaturas, além de sua elevada dureza e resistência à temperatura ambiente, alta resistência à formação de cratera e baixa condutividade térmica”.

As cerâmicas são a base de alumina (Al_2O_3) e podem ser categorizadas como cerâmicas óxidas, puras ou com adição de óxido de zircônio. Além disso, mantêm a mesma dureza e condições de compressão a $1100^\circ C$, e por causa da estabilidade química da alumina, somado ao baixo coeficiente de atrito, apresenta alta resistência ao desgaste. Pelo fato de poder atuar em temperaturas mais elevadas (na ordem de 1600°), permitem a utilização de velocidade de corte mais elevada do que o metal duro, reduzindo o tempo de usinagem. A adição do dióxido de zircônio (ZrO_2) oferece um pouco de tenacidade para a ferramenta, viabilizando sua aplicação em condições específicas, como a de torneamento em aços endurecidos, com a elevada resistência ao desgaste, característico das cerâmicas. Não é recomendada para operações com corte interrompido (FRACARO, 2017).

Já as opções com cerâmicas mistas com adição de TiN ou TiC, com acréscimo de dióxido de titânio (TiO_2), dióxido de zircônio (ZrO_2) e carboneto de tungstênio (WC), oferecem ótimos resultados tanto no desbaste quanto no acabamento de aços, e devido às suas características diferenciadas, permitem velocidades de corte maiores do que ferramentas de metal duro (FRACARO, 2017).

2.3 USINABILIDADE E VIDA DA FERRAMENTA

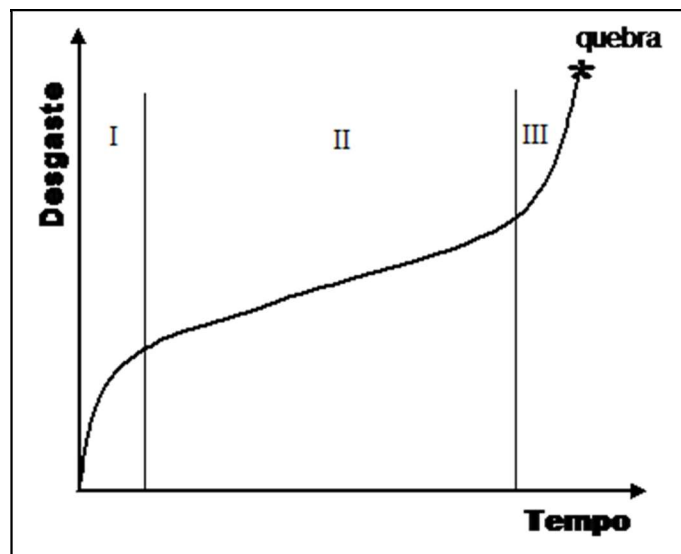
Para Diniz et al (2010), usinabilidade é uma grandeza que expressa um conjunto de propriedades de um material em relação a outro. Chiaverini (2002) complementa o conceito como sendo a facilidade em que um metal pode ser cortado, de acordo com suas configurações.

Em quase todas as operações de usinagem industrial, a ação de corte altera gradualmente a forma da aresta cortante, fazendo com que a ferramenta diminua a eficiência de usinagem com o tempo por meio de desgastes (TRENT, 1991). Existem três modos principais que uma ferramenta pode falhar: fratura, temperatura e desgaste gradual. A falha de fratura ocorre quando a força de corte na ponta da ferramenta aumenta de forma demasiada, causando falha repentina por fratura frágil. A falha de temperatura ocorre quando a temperatura de corte é muito elevada, causando uma perda de dureza da aresta de corte, deformação plástica e perda de afiação. Por fim, o desgaste gradual ocorre por perda da forma da ferramenta, redução na eficiência do corte, aceleração no desgaste, conforme a ferramenta se desgasta (GROOVER,

1987). Para Ferraresi (1970), é denominado como vida da ferramenta “o tempo que trabalha até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido”.

Em usinagem, normalmente as ferramentas de corte se desgastam seguindo uma curva padrão, representada na Figura 2.4. Observa-se que na evolução do desgaste são atingidos três estágios, I, II e III.

Figura 2.4 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta em relação ao tempo



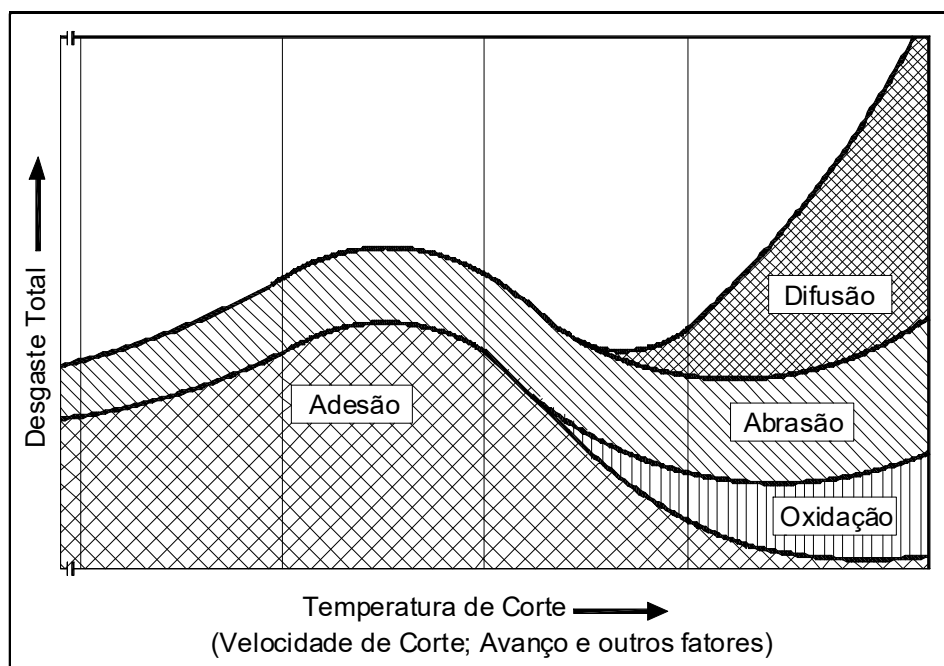
Fonte: MACHADO (1991)

O estágio I é o inicial. Correspondente aos primeiros minutos de corte, onde a taxa de desgaste da ferramenta é elevada devido à adequação do sistema tribológico envolvido. O estágio II caracteriza-se por uma taxa de desgaste constante ao longo do tempo e mais estável. No início do estágio III, o desgaste sofre uma aceleração, aumentando acentuadamente a taxa, com níveis de tensões e temperatura cada vez maiores, que tendem a resultar em colapso da ferramenta em curto espaço de tempo. Os engenheiros e técnicos envolvidos devem, portanto, evitar que a ferramenta atinja esse patamar, considerado como o fim da vida da ferramenta (ISO 3685 1977).

2.3.1 Mecanismos de desgaste

Os principais mecanismos de desgaste são adesão, difusão, abrasão e oxidação. Na Figura 2.5, são apresentadas as relações desses mecanismos com a velocidade de corte ou em função da temperatura.

Figura 2.5 - Mecanismos de desgaste



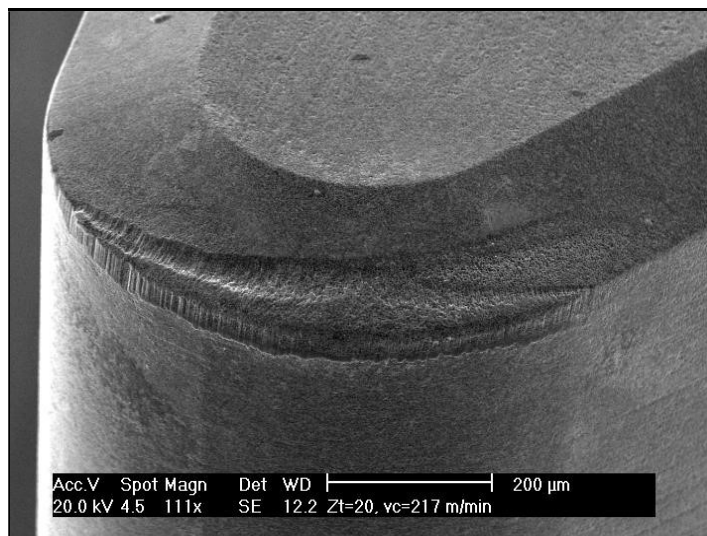
Fonte: REBEYKA (2016)

2.3.1.1 Desgaste por abrasão mecânica

Groover (1987) cita que abrasão é uma ação de desgaste mecânico causada por partículas duras no material de trabalho. Quando dois ou mais metais são forçados a entrar em contato sob alta pressão e temperatura, adesão ou soldagem ocorrem entre eles. Essas condições ocorrem entre o cavaco e o ângulo de saída da ferramenta. À medida que o cavaco flui pela ferramenta, pequenas partículas se separam da superfície, resultando em atrito. Esse mecanismo aumenta com o número de inclusões e partículas duras no aço (carbonetos e óxidos, por exemplo).

A dureza do material da ferramenta influencia muito na resistência à abrasão. Um aumento de velocidade de corte amplia a do desgaste pelo efeito de impacto, e redução da vida da ferramenta por abrasão em elevadas temperaturas de trabalho (STEMMER, 2005). Esse tipo de mecanismo de desgaste é muito significativo na usinagem com ferramentas revestidas, cerâmicas puras e cerâmicas mistas. Em ferramentas de corte, a abrasão pode ocorrer por meio de precipitados duros (óxidos, carbonetos, nitretos ou carbonitretos), pertencentes ao material da peça ou do cavaco. Também pode ocorrer desgaste abrasivo por partículas do material da própria ferramenta (HUTCHINGS, 1992). A aparência característica do desgaste abrasivo é apresentada na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Desgaste Abrasivo em ferramentas de PCBN após usinar aço ABNT 5140



Fonte: CAMPOS (2004)

No exemplo da Figura 2.6, trata-se de um aço ABNT 5140 (DIN 19MnCr5), endurecido a 58 HRC usinado com ferramentas de cerâmica (PCBN). Mesmo com elevada dureza, não seria o aço o fornecedor das partículas abrasivas, e sim da própria ferramenta.

2.3.1.2 Desgaste por Aderência

Na literatura, esse mecanismo de desgaste é frequentemente tratado por adesão (HUTCHINGS, 1992 apud König e Klocke, 1997). Quando duas superfícies são colocadas em contato sob esforços moderados, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte ocasionam entre elas um extrato metálico, provocando aderência. Partículas de uma superfície migram para a outra. Esse fenômeno também está presente no GPC (Gume Postiço de Corte). Por meio dele, as partículas da ferramenta seguem aderidas ao fluxo de cavaco da peça (DINIZ *et al.*, 2010). Esse fenômeno é responsável pelo desgaste de flanco e de cratera. Mesmo ocorrendo em baixas velocidades de corte, se houver irregularidade no fluxo de cavaco, pode acontecer em velocidades maiores (DINIZ *et al.*, 2010).

2.3.1.3 Desgaste por Difusão

Esse mecanismo envolve a transferência de átomos de um material para outro e é dependente da temperatura, do tempo de usinagem e da solubilidade dos elementos que estão

na zona de fluxo (MACHADO, 1991). Essa troca de átomos entre o material da peça e da ferramenta, afeta a dureza da aresta de corte. Conforme o mecanismo cresce, a ferramenta fica mais suscetível à abrasão e à adesão. A difusão é o principal mecanismo de desgaste da cratera (GROOVER, 1987). Os estudos apresentados na obra de Ferraresi (1970) apresentam que na faixa de 1200° e 1500° C, entre o aço e o metal duro, ocorre difusão do ferro na fase de cobalto, difusão do cobalto no aço e dissolução do carvão de tungstênio com conseqüente formação de carbeto mistos. O carbono liberado é dissolvido e difunde em direção ao aço ocasionando o mecanismo. Diniz *et al.*, (2010) cita que o desgaste de difusão não ocorre nas ferramentas de cerâmica.

2.3.1.4 Desgaste por Oxidação

Elevadas temperaturas e a presença de ar e água (como nos fluidos de corte) geram oxidação em grande parte dos metais (DINIZ *et al.*, 2010). O aquecimento da ferramenta junto à aresta cortante é tão elevado, que se forma uma película de óxido mesmo em condições normais de corte (FERRARESI, 1970). Metais duros já iniciam a formação de carepas em temperaturas entre 700 e 800°C, que é a faixa de temperatura usual da usinagem. Por causa disso, o desgaste é menor em operações com atmosfera neutra do que na presença de ar. A oxidação em baixas temperaturas é normalmente evitada por camadas protetoras de material oxidado (STEMMER, 2005).

2.3.2 Tipos de desgaste

2.3.2.1 Gume Postiço de Corte (GPC)

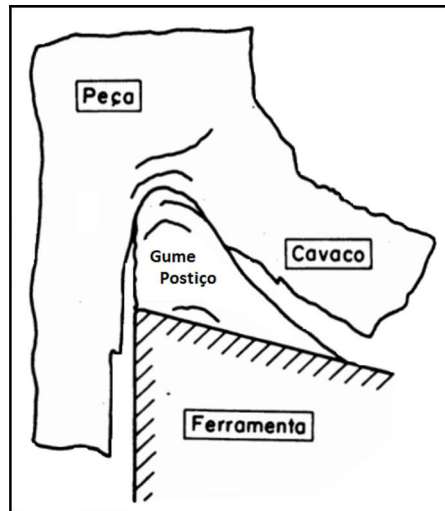
Na usinagem, muitas vezes pode ser formada uma camada de cavaco aderente à aresta de corte, modificando o comportamento da usinagem em relação à força de corte, acabamento superficial da peça e desgaste da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2010). A Figura 2.7 ilustra o GPC.

Conforme Ferraresi (1970 pg. 368), a “aresta postiça de corte é constituída de partículas do material usinado que se acumula na superfície de saída da ferramenta”. Como pode ser verificado na Figura 2.8, o GPC é caracterizado por ocorrer em baixa velocidade de corte.

À medida que a velocidade de corte cresce, a temperatura de corte também se eleva. Quando é ultrapassada a temperatura de recristalização do material do cavaco, o GPC não se

forma pela presença de novos grãos e conseqüentemente elimina a possibilidade de encruamento do mesmo, fator fundamental para a aresta postiça.

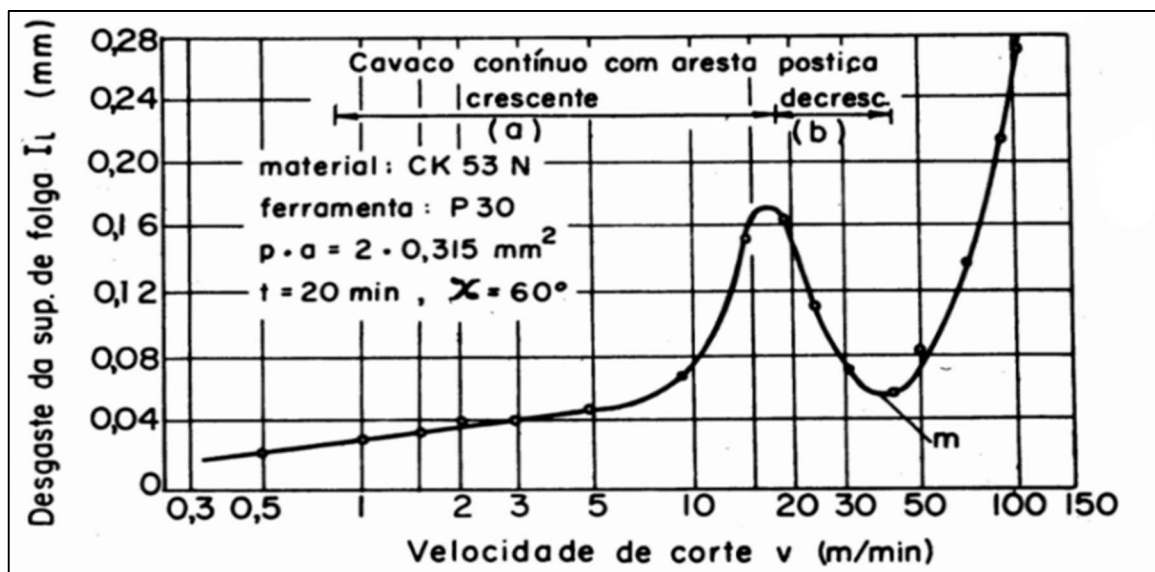
Figura 2.7 - Gume Postiço de Corte



Fonte: FERRARESI (1970)

Além disso, à medida que a ductilidade do material da peça diminui, decresce também a ocorrência da aresta postiça, pois com cavacos menores ocorre menor atrito com a superfície da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2010).

Figura 2.8 - Variação do desgaste da superfície de folga da ferramenta em função da velocidade de corte, para um de usinagem constante.



Fonte: Ferraresi (1970)

2.3.2.2 Desgaste Frontal

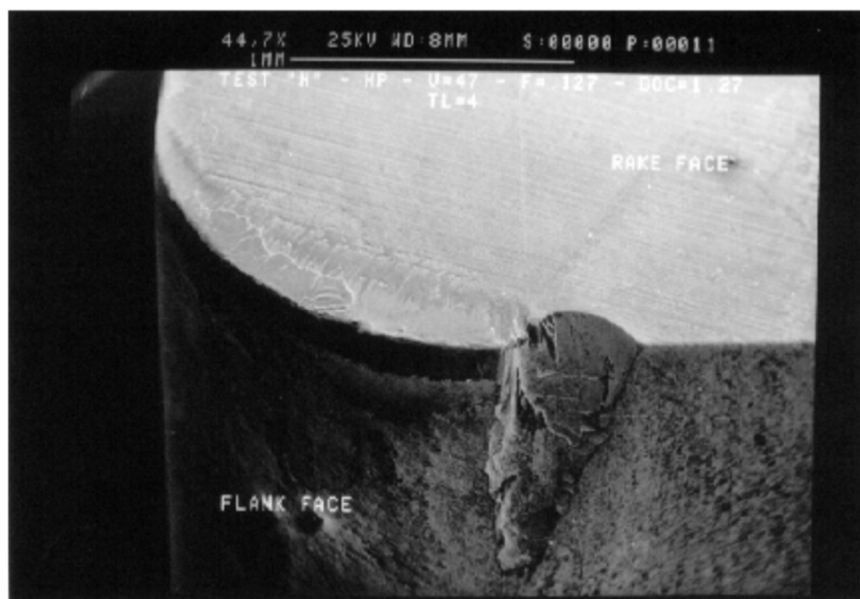
Também chamado de desgaste de flanco, ocorre na superfície de folga da ferramenta e é causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. Em geral, o desgaste cresce proporcionalmente à velocidade de corte, embora essa não pode ser baixa o suficiente para gerar aresta postiça de corte (DINIZ *et al.*, 2010).

2.3.2.3 Desgaste de entalhe

Também ocorre entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Esse desgaste é potencializado pelo aumento da temperatura e pela elevação da velocidade de corte (DINIZ *et al.*, 2010). Geralmente, nas regiões onde ocorre o desgaste, as condições de escorregamento prevalecem e o mecanismo de desgaste envolve abrasão, bastante influenciado pelas interações com a atmosfera (TRENT e WRIGHT, 2000). Conforme Machado (1990), o aumento da velocidade de corte faz crescer a taxa de desgaste. Esse tipo ocorre principalmente na usinagem de materiais resistentes a temperaturas elevadas, tais como: ligas de níquel, titânio, cobalto e aço inoxidável.

Na Figura 2.9, pode ser visualizado o desgaste de entalhe resultante da usinagem do material Inconel 901, utilizando uma ferramenta de metal duro K20.

Figura 2.9 - Desgaste de entalhe na aresta da ferramenta



Fonte: MACHADO (1990)

2.3.2.4 Lascamento

Conforme Stemmer (2005), o lascamento ocorre devido à sobrecargas de origem térmica ou mecânica do gume, quando a ferramenta tem baixa resistência, devido ao ângulo de cunha muito pequeno ou pastilhas muito duras, com pouca tenacidade para a aplicação. Além disso, vibrações no processo, cortes interrompidos, inclusões duras no material usinado, dimensões excessivas de cavaco também podem ocasionar o lascamento.

2.3.2.5 Trincas

Avárias provocadas pela variação da temperatura e dos esforços mecânicos e podem ocorrer por origem térmica ou mecânica. Para se evitar o desgaste por trinca, pode-se escolher uma ferramenta mais tenaz (DINIZ *et al.*, 2010).

2.3.2.6 Quebras

São ocasionadas quando os desgastes e avarias das ferramentas crescem demais. Em algumas vezes, essa quebra pode ocorrer de forma inesperada devido à ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de cunha pequeno, parada instantânea do movimento de corte, excesso de cavacos no local de usinagem, entre outros (DINIZ *et al.*, 2010).

2.3.3 Medição dos desgastes de ferramenta

Conforme a norma ISO 3685:1993, o desgaste de ferramentas deve ser controlado para maximizar o rendimento e substituir a ferramenta antes da quebra. Na superfície de saída ocorre o desgaste de cratera (KT), largura de cratera (KB) e a distância do centro da cratera à aresta de corte (KM). Na superfície de folga é medido a largura do desgaste de flanco (VB), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga, e a largura máxima do desgaste de flanco (V_{Bmax}). Ainda é medido o valor dos desgastes gerados nas superfícies de folga pelos entalhes (V_{BN} e V_{BC}) (DINIZ *et al.*, 2010). A Figura 2.10 mostra isso.

A norma ISO 3685:1993 estabelece os critérios para determinar vida útil em ferramentas de metal duro, como sendo:

$$KT = 0,06 + 0,3 f$$

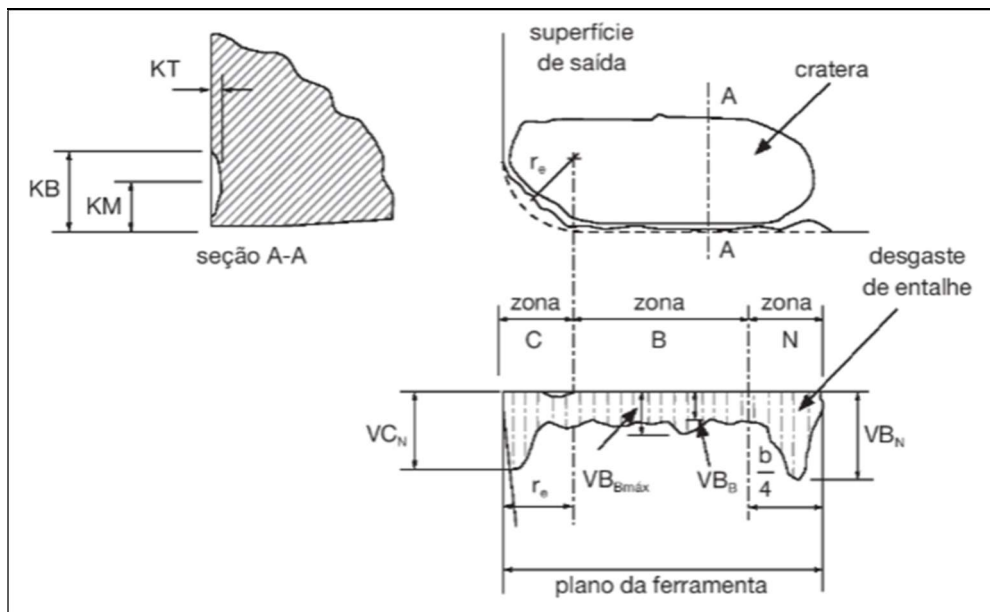
$VB_B = 0,3$ mm, embora para aços endurecidos utiliza-se 0,2 mm de limite em alguns casos.

$$VB_{Bmax} = 0,6$$
 mm

$$VB_N = 1$$
 mm

Onde f é o avanço de corte em mm/rotações.

Figura 2.10 - Parâmetros utilizados para medir o desgaste



Fonte: REBEYKA (2016)

Quando um ou mais parâmetros de controle ultrapassam o limite é recomendada a substituição da ferramenta devido à iminência de quebra (DINIZ *et al.*, 2010).

Nas ferramentas de metal duro, geralmente o desgaste frontal é maior do que o de cratera. Os desgastes aumentam progressivamente até a quebra da aresta de corte. Na usinagem de peças de aço com ferramentas de metal duro, a quebra se dá para valores de VB entre 0,2 e 0,4 mm, onde as coberturas dos inserts já estão praticamente consumidas pelo desgaste, e, portanto, o desgaste de flanco aumenta rapidamente. A troca deve ser realizada após esta condição (Diniz *et al.*, 2010). Kartha (2020) utilizou em seu estudo de torneamento de aço, como alguns dos critérios para determinação de fim de vida útil, um desgaste de flanco (VB_B) máximo de 0,2 mm.

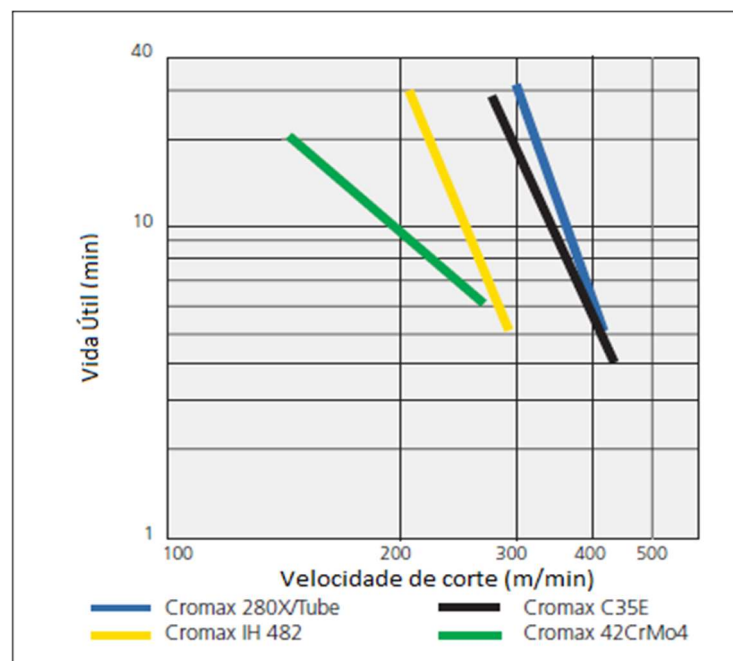
As condições de usinagem influenciam muito no desgaste e na vida da ferramenta, sendo afetadas pela velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. A velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia no desgaste, pois o aumento resulta em elevação da energia no

processo, aplicada em uma região de mesma área, que recebe todo o calor. Em segundo fator de importância, temos o avanço, no qual seu acréscimo também aumenta a temperatura, porém com simultâneo aumento de área, que auxilia na distribuição de calor. Já a influência da profundidade de corte é menor (Diniz et al., 2010). Ferraresi (1970) ainda complementa que “a variação da vida da ferramenta de metal duro com a velocidade de corte é bem mais sensível que para com a pastilha de cerâmica”. Uma das formas práticas para controlar o desgaste de ferramentas de usinagem é pelo tempo de usinagem (Diniz *et al.*, 2010).

2.3.4 Estudos de torneamento de aços endurecidos

O fabricante OVAKO apresenta em seu catálogo de fornecimento, resultados de testes de usinagem desenvolvidos em quatro tipos de materiais fornecidos, sendo eles: Cromax 280 X/Tube, Cromax IH 482, Cromax C35E e o Cromax 42CrMo4 (similar ao ASTM 4140). Os resultados podem ser verificados na Figura 2.11. Utilizaram para testes um inserto de metal duro revestido, com um revestimento CVD TiCN + AL₂O₃ + TiN, e que pode ser aplicado em classes P, M e K (SANDVIK, site 2020). Como parâmetros de usinagem foram utilizados o avanço de 0,4 mm/volta e a profundidade de usinagem (a_p) de 2 mm. Como critério limite de desgaste, definiram-se 0,4 mm de VB.

Figura 2.11 - Usinabilidade dos aços Cromax



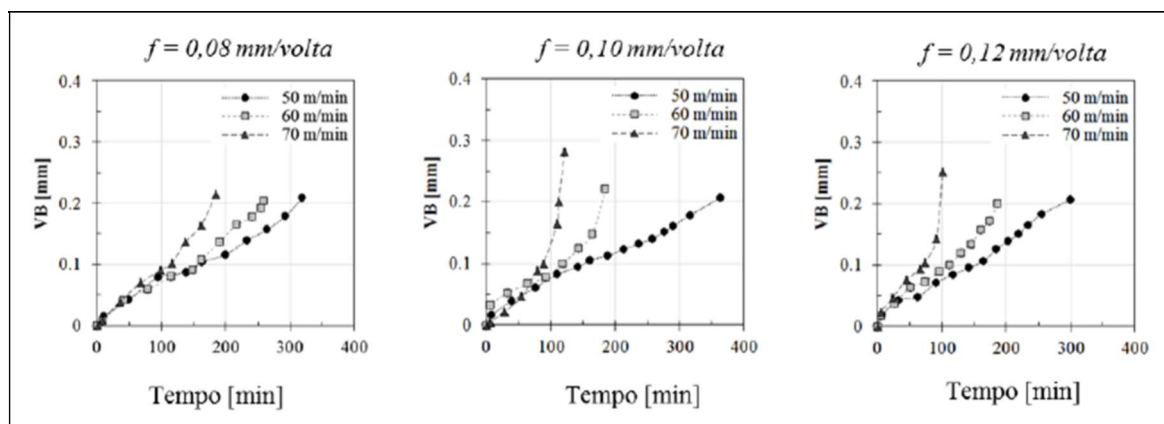
Fonte: OVAKO

Como pode ser visto, a linha verde do gráfico corresponde ao material em estudo Cromax 42CrMo4 e ilustra o desempenho em vida útil da ferramenta, considerando variação de velocidade de corte de 150 m/min a aproximadamente 270 m/min. Conforme a velocidade de corte aumenta, a vida útil da ferramenta reduz significativamente.

Boing (2016) testou uma opção de insertos de metal-duro revestido (PVD TiAlN e CVD TiCN + Al_2O_3 + TiN) no torneamento de aço endurecido AISI 4340, em uma faixa de dureza entre 30 e 60 HRC. Ele utilizou como parâmetros velocidade de corte de 150 m/min, avanço de 0,08 mm/volta e profundidade (a_p) de 0,2mm. Nos seus experimentos, verificou-se que as ferramentas de metal duro oferecem vida útil muito reduzida em condições de aplicação acima de 50 HRC de dureza.

Outros tipos de materiais que assemelham com as condições de usinabilidade do aço 42CrMo4 temperado e cromado superficialmente são alguns aços inoxidáveis. Rosa (2017) realizou um estudo de torneamento com aço inoxidável AISI 420 C endurecido a 53 HRC, para análise de vida útil e desgaste das ferramentas de metal duro. O autor utilizou velocidades de corte de 50, 60 e 70 m/min, com variações de avanço nas faixas de 0.08, 0.10 e 0.12 mm/min com profundidade de corte (a_p) de 0,4mm. O resultado pode ser verificado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Evolução do desgaste de flanco (VB) em função do tempo de corte para diferentes combinações de parâmetros de corte.



Fonte: ROSA (2017)

Os resultados apresentaram que, para todas as combinações, a vida útil das ferramentas diminui conforme aumenta a velocidade de corte. Como critério de limite de desgaste foi definido 0,2mm de VB. A ferramenta utilizada foi uma TNMG SF 1105 de metal duro com

revestimento de TiAlN. A configuração com maior velocidade de corte (80 m/min) e o avanço de 0,12 mm/volta geraram lascamento precoce na ferramenta de usinagem.

Em seu estudo do torneamento do aço inoxidável duplex, utilizando ferramentas de metal duro com revestimentos, Aguiar (2012) testou três tipos de insertos com revestimentos diferentes. A primeira ferramenta de TiN + Al_2O_3 + TiCN, a segunda de Al_2O_3 + TiCN e a terceira com revestimento apenas de TiAlN, com variações de velocidades de corte entre 80m/min e 110 m/min.

Quando a velocidade de corte aumentou, foi necessária uma ferramenta de corte com maior resistência à temperatura, como é o caso da ferramenta de TiAlN, que tem um coeficiente de atrito maior. O revestimento com Al_2O_3 , devido à sua afinidade química com a camada passiva de cromo promovendo adesão, potencializou desgaste de ferramentas. Em termos de vida da ferramenta, o revestimento da primeira ferramenta TiN + Al_2O_3 + TiCN foi o que teve o melhor resultado geral. Isso foi causado pelo menor coeficiente de atrito, que favorece para um bom desempenho em velocidades de corte mais baixas.

O parâmetro com velocidade de corte de 80 m/min teve o melhor resultado. Observando vida útil e desgaste e utilizando ferramentas de um compósito de cerâmica, Braga (2017), dentre os materiais estudados, utilizou aço endurecido e aplicou velocidades de corte variando de 100 m/min até 450 m/min., com avanço de 0,05 mm/volta e profundidade de 0,2 mm. Nas velocidades de corte mais baixas ocorreram desgastes abrasivos do tipo flanco e aderência, com desempenho melhor de vida útil com velocidades de corte na faixa de 250 m/min.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as condições de usinagem utilizadas na produção das hastes cromadas e a proposta de outra ferramenta alternativa para efeitos comparativos. Também apresenta os recursos que foram utilizados para a realização dos experimentos, assim como os procedimentos utilizados na execução. O objetivo é facilitar o entendimento dos métodos experimentados, com os detalhes de execução, viabilizando sua reprodução conforme o interesse de profissionais e estudantes, tanto para fins industriais quanto para acadêmicos.

3.1 CONDIÇÕES DE USINAGEM

O torneamento da superfície endurecida e cromada das hastes era realizado na empresa parceira utilizando um inserto de metal duro WNMG 080412-MF5 de classe TH1000. As peças produzidas configuram diâmetro de 45 mm e a região usinada compreende um comprimento de 15 mm apenas. Os parâmetros de corte utilizados eram de velocidade de corte de 100 m/min, com profundidade de corte (a_p) de 0,2 mm; avanço (f) de 0,15 mm/volta. O processo determinava a necessidade de troca de ponta de inserto a cada dez peças, por considerar uma quantidade limite segura para evitar que a ferramenta ultrapasse o fim de vida útil. A elevada dureza superficial constitui um grande desafio para a usinagem desse tipo de material e solicita uma ferramenta com características adequadas para a aplicação, até mesmo pelo fato de resultar em temperatura elevadas no processo.

Afim de encontrar uma opção com melhor desempenho em vida útil, não reduzindo o tempo de produção, fez-se a necessidade de realizar testes com a ferramenta atual, em outras configurações de parâmetros de usinagem. Conforme informações das literaturas e dos outros trabalhos desenvolvidos nessa área, tomados como referência (FERRARESI, 1970; DINIZ *et al.*, 2010; AGUIAR, 2012; BOING, 2016; BRAGA, 2017; ROSA, 2017), optou-se por variar apenas as condições de corte, visto que são mais representativas e determinantes para a vida útil das ferramentas, e têm efeito significativo também no tempo de usinagem.

Para comparar desempenho, uma outra ferramenta com aplicação nas mesmas condições de usinagem fez-se necessária. Conforme as informações pesquisadas em Fracaro (2017) e Braga (2017), insertos de cerâmica, tanto as puras quanto as mistas, apresentam um desempenho satisfatório para essa aplicação. Além de uma vida útil maior do que o metal duro devido às suas propriedades, tendem inclusive a oferecer redução de tempo de produção, o que

também é interessante como melhoria e otimização de processo. O fato de que os materiais cerâmicos trabalham com maior resistência ao desgaste do que o metal duro em elevadas temperaturas, favorece a utilização em operações com maior velocidade de corte. Sendo assim, testes foram aplicados em dois tipos de ferramentas (sendo uma delas a condição já utilizada na produção da empresa parceira), com as mesmas variações e condições, com o propósito de avaliar os resultados.

3.2 EQUIPAMENTOS

3.2.1 Máquina ferramenta

Os ensaios foram realizados em um torno CNC, da marca Doosan Infracore, modelo PUMA 400L MA; Potência Máxima do eixo da árvore de 22kW; Capacidade nominal de 47,97 kVA; corrente máxima de 69,24 A; massa de 3800 Kg; Velocidade máxima de 3500 RPM.

3.2.2 Lupa com escala de Medição

As medições dos desgastes e avarias das ferramentas foram realizadas com auxílio de uma lupa com escala de medição, como ilustrado na Figura 3.13. Utilizada ao final da usinagem de cada peça.

Figura 3.13 - Lupa com escala de medição



Fonte: Autor

3.2.3 Esteroscópio Trinocular

As medições finais dos desgastes e avarias das ferramentas foram realizadas com o auxílio de um esteroscópio trinocular de medição universal da marca Entex, modelo TNB-10B, que proporciona ampliação de sete a 45 vezes. O equipamento estava acoplado a um computador contendo o *software* ScopePhoto 2.0.4, utilizado para a captura das imagens e medição dos desgastes e avarias.

Figura 3.14 - Esteroscópio Trinocular



Fonte: UCS

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Corpos de Prova

Os ensaios foram realizados em barras laminadas de aço do fornecedor OVAKO, com a denominação do fabricante sendo Cromax 42CrMo4, equivalente ao aço ASTM 4140 com limite de escoamento de 650 Mpa; limite de resistência à tração de 1000 Mpa e dureza do material base de 300 HB (OVAKO). As composições químicas do material base são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise Química do aço Cromax 42CrMo4 em percentual da estrutura

C %	Si %	Mn %	S %	Cr %	Mo %
0,42	0,25	0,08	0,02	1,05	0,20

Fonte: OVAKO

O material é endurecido superficialmente com processo de têmpera por indução e cromado com espessura de camada entre 0,02 a 0,05 mm, com dureza na camada de 850 HV (equivalente a 65,5 HRC). A dureza do material temperado, logo abaixo da superfície cromada, é de 45 a 55 HRC, em uma profundidade média de 2 mm (OVAKO).

Os corpos de prova utilizados para os testes de torneamento longitudinal, afim de avaliar vida de ferramenta e desgaste, possuem diâmetro de 45mm e comprimento de 260mm. Foi contabilizado como sendo uma peça a cada usinagem de 15 mm no desbaste longitudinal. A profundidade de corte (a_p) foi de 0,2 mm, atingindo, portanto, a região superficial endurecida pela têmpera de indução e cromagem.

3.3.2 Dispositivos de fixação para usinagem

A fixação da peça foi feita por um sistema de placa com pinça de 45 mm para fixação externa, com um batente interno na placa da máquina, garantindo que a peça seja posicionada com 110 mm de seu comprimento para fora do dispositivo e sem a necessidade de contra ponto, conforme a Figura 3.15.

Figura 3.15 - Corpo de Prova posicionado para usinagem

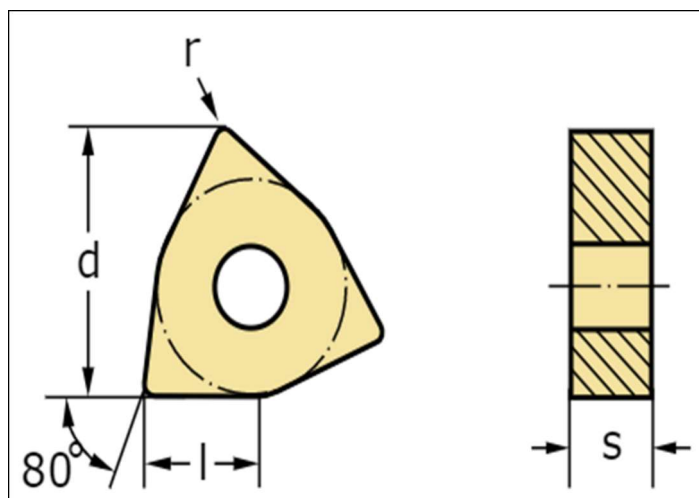


Fonte: Autor

3.3.3 Ferramentas de Corte

Durante os experimentos foi utilizado o suporte para torneamento modelo MWLNL-2525-M08. Os insertos de modelo WNMA, que foram usados nos testes, estão representados pela Figura 3.16.

Figura 3.16 - Geometria de insertos W



Fonte: Walter-Tools

3.3.3.1 Ferramenta 1

A primeira opção de ferramenta é o inserto WNMG080412-MF5 TH1000, fornecido pela SECO. O item já era utilizado na produção das peças, cujo desempenho foi avaliado tanto na condição aplicada quanto nas demais configurações estipuladas para teste. Essa ferramenta é recomendada para aplicações de classes S e H, com faixa de parâmetros de corte sugeridas conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros Recomendados para a Ferramenta 1

Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/volta)
110 – 145	0,24 – 0,30

Fonte: SECO

Em relação à sua geometria WNMG, as informações são apresentadas na Tabela 3. A Sigla MF5 está relacionada ao tipo de quebra cavaco, que neste caso, é indicado para semi-acabamento de aços inoxidáveis com avanço elevado.

A classe TH1000 possui micro grão de elevada dureza e é indicada para componentes em aço parcialmente endurecido e superligas, devido à sua tenacidade de aresta, que também oferece elevado desempenho em remoção de superfícies duras. Possui cobertura de Ti-Al-Si-N realizada por PVD.

Tabela 3 - Informações sobre a geometria da Ferramenta 1

Descrição	Valor
Ângulo de folga maior	0,0 deg
Diâmetro do furo de fixação	5,2 mm
Ângulo de ponta	80.0 deg
Classe	TH1000
Diâmetro do círculo inscrito	12,70 mm
Comprimento teórico da aresta de corte	8,70 mm
Raio de Ponta	1,20 mm
Espessura da Pastilha	4,76 mm

Fonte: SECO

O desempenho em termos de desgaste e vida útil de uma ferramenta de metal duro, em velocidades de corte mais baixas (faixa de 100 m/min e 150 m/min), tende a ser melhor do que nos valores mais elevados (faixa de 200 m/min e 250 m/min), como pode ser verificado nos testes da OVAKO, nos trabalhos anteriormente já citados como os de Boing (2016), AGUIAR (2012), em resultados apresentados por Ferraresi (1970) e DINZ et al (2010), além de testados e indicados pelos próprios fabricantes das ferramentas. Isso se deve principalmente pelo fato de que a usinagem de aços endurecidos apresenta grandes esforços e temperaturas muito elevadas nessas condições de alta velocidade e alta taxa de remoção de material. Com uma temperatura mais elevada, a aresta de corte sofre perda de dureza e o desgaste conseqüentemente ocorre mais rapidamente.

Mesmo sendo esperado um desempenho menor das ferramentas com velocidade de corte maior nos insertos de metal duro, foi considerado válido executar testes nessas faixas de parâmetros por fins comparativos e de comprovação dos conceitos já estudados e comprovados nas literaturas de referência. Nos testes realizados nas quatro faixas de velocidade foram verificadas as comprovações desses conceitos, tanto com a perda de vida útil quanto nos mecanismos desgastes.

3.3.3.2 Ferramenta 2

A segunda opção utilizada foi um inserto de cerâmica do fornecedor Sumitomo, da série SUMBIRON revestido. As ferramentas constituem-se de substrato com composição de CBN

contendo Al_2O_3 . A classe BNC2020 é recomendada para torneamento de aço temperado por indução (H) com dureza entre 50 e 67 HRC, aplicado em velocidades de corte entre 80 e 200 m/min.

O aglutinante da ferramenta é TiN com revestimento de TiCN multicamadas.

A recomendação do fabricante é utilizar parâmetros, conforme apresentados na Tabela 4, com uma profundidade de corte (A_p) de 0,03 a 0,5 mm. A geometria utilizada também será a “W”.

Tabela 4 - Parâmetros Recomendados para a Ferramenta 2

Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/volta)
80 – 200	0,03 – 0,40

Fonte: SUMITOMO

Insertos de materiais cerâmicos são mais duros do que os de metal duro, e além disso, sua composição é mais resistente a grandes esforços e elevada temperatura de corte. O óxido de alumínio (Al_2O_3) da cobertura do inserto também auxilia na resistência ao desgaste devido às suas propriedades em temperaturas e esforços elevados, além do baixo coeficiente de atrito. Por esses fatores principais, é possível (e mais adequado) aplicar usinagem com velocidades de corte maiores. Conforme verificado nas informações contidas no referencial teórico e em trabalhos recentes aplicados em condições semelhantes de usinagem, os insertos de cerâmica apresentam melhor desempenho nas faixas de velocidade de corte mais altas. É esperado, portanto, que o desempenho dessa segunda ferramenta seja consideravelmente maior do que na aplicação do inserto de metal duro, mesmo sendo específica para aços endurecidos. Principalmente com velocidades de corte maiores (faixas de 200 m/min e 250 m/min), a ferramenta tende a ter um desempenho ainda melhor devido às suas características mecânicas.

3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para cada um dos dois tipos de ferramentas, foram aplicadas as mesmas condições de profundidade de corte (a_p) de 0,2 mm e com velocidade de avanço (f) sendo 0,15 mm/volta. Para as opções das ferramentas, foram testados quatro valores de velocidade de corte, sendo 100, 150, 200 e 250 m/min. Essas faixas foram escolhidas, pois abrangem a amplitude de aplicação dos dois tipos de ferramentas de teste.

A ferramenta de metal duro tem a faixa de aplicação em velocidades de corte mais baixas, enquanto que a ferramenta BCN2020 atinge até 200 m/min. A faixa de 250 m/min foi testada, pois em alguns ensaios e artigos foram aplicadas condições de usinagem em aços endurecidos com essa configuração, obtendo um resultado satisfatório. É de se esperar que, mesmo na ferramenta de cerâmica, o teste com velocidade de corte de 250 m/min não resulte na melhor alternativa, mas mesmo assim o teste serve para comprovação das recomendações e comparação com as demais situações. Não foram testadas mais faixas intermediárias devido à disponibilidade de material e tempo de operação limitadas, o que acarretaria em um valor significativo de custo, além de excessiva demora para execução, análises e conclusões do trabalho. O avanço de 0,15mm/volta foi escolhido como sendo padrão em todos os testes, pelo fato de encontrar-se em uma faixa de aplicação satisfatória para os dois tipos de ferramentas, inclusive dentro das recomendações dos fabricantes. Variações nos avanços acarretariam em muitos testes, o que se tornaria inviável. Além disso, pelo fato de que a velocidade de corte é mais significativa, optou-se por um avanço que não interferisse nos resultados, caso estivesse em faixas extremas de recomendação.

A profundidade de 0,2 mm é justificada principalmente pela faixa de dureza máxima da peça. Pelas características do material, quanto maior a profundidade de torneamento, menor a dureza em direção ao núcleo da peça. Uma ferramenta com composição e parâmetros de usinagem adequados para material duro apresenta desempenho insuficiente ao usinar regiões mais macias e pode acarretar em outros tipos de mecanismos de desgaste, comprometendo os resultados. É a região da peça que tem o máximo de dureza por ter a região mais endurecida pelo processo de têmpera por indução e por ser recoberta pela camada de cromo. Sendo assim, foram realizados dois conjuntos de quatro testes, referentes aos dois tipos de ferramentas conforme apresentados na Tabela 5. A avaliação da vida da ferramenta foi realizada utilizando o critério VB com limite de 0,2 mm. A medição foi efetuada em cada peça com auxílio da lupa com escala de medição. Em cada ciclo de usinagem foi retirado a ferramenta do suporte da máquina e medido o desgaste. A utilização de lupa métrica para medição, oferece menor precisão do que um microscópio, por exemplo, devido a maior probabilidade de erro operacional de leitura. Mas devido a não disponibilidade de equipamento de maior precisão na medição, e a necessidade de realização de diversas medições, optou-se pela lupa, visto que a imprecisão pode ser mais significativa apenas na fase inicial de estágio I de desgaste de cada teste, onde a medida é menor. Os resultados dos experimentos que se concentram nas etapas de fim de vida da ferramenta (final de estágio II e estágio III do desgaste), tendem a não ser

afetados de forma significativa ao utilizar este método operacional. Após medição e registro, cada ferramenta foi novamente fixada no suporte, e o programa CNC ajustado para executar um novo ciclo. Registrou-se o crescimento do desgaste ao longo de cada teste até atingir a medida de limite, e foi observado os mecanismos e/ou tipos de desgaste para as aplicações.

Tabela 5 - Proposta de Testes para Usinagem

Testes	Parâmetros de Usinagem		
	V_c	F	A_p
	(m/min)	(mm/volta)	(mm)
T1 Fer. 1	250	0,15	0,2
T2 Fer. 1	200	0,15	0,2
T3 Fer. 1	150	0,15	0,2
T4 Fer. 1	100	0,15	0,2
T5 Fer. 2	250	0,15	0,2
T6 Fer. 2	200	0,15	0,2
T7 Fer. 2	150	0,15	0,2
T8 Fer. 2	100	0,15	0,2

Fonte: Autor

Para cada tipo de ferramenta, foi utilizado apenas 1 inserto para análise e medições, devido ao custo elevado, principalmente do inserto de cerâmica. Desta forma, os experimentos foram aplicados em uma aresta específica para cada teste, sendo, portanto, utilizadas 4 arestas em cada um dos insertos. Antes de iniciar os testes, utilizou-se um inserto de metal duro igual utilizado como ferramenta 1, para ajustar as medidas e garantir a execução dos ensaios sem problemas. Com as condições ajustadas, e simulações de usinagem realizadas, os experimentos foram realizados. Após a execução dos testes, as análises dos resultados determinaram os comportamentos das ferramentas, apresentando os desempenhos de vida útil com exposição dos valores e gráficos, além das imagens dos desgastes obtidos nos ensaios. Desta forma, foi definido a aplicação mais satisfatória dentre os experimentos, com referência comparativa com os resultados esperados na literatura tomada como base de informação. O anexo 1 apresenta o programa CNC utilizado como base para realização dos testes. Nos ensaios com 250 m/min, a RPM da usinagem do diâmetro de 44,60 mm foi de 1784, enquanto que nas demais velocidades de corte de 200 m/min, 150 m/min e 100 m/min, a RPM respectiva foi de 1427, 1071 e 714.

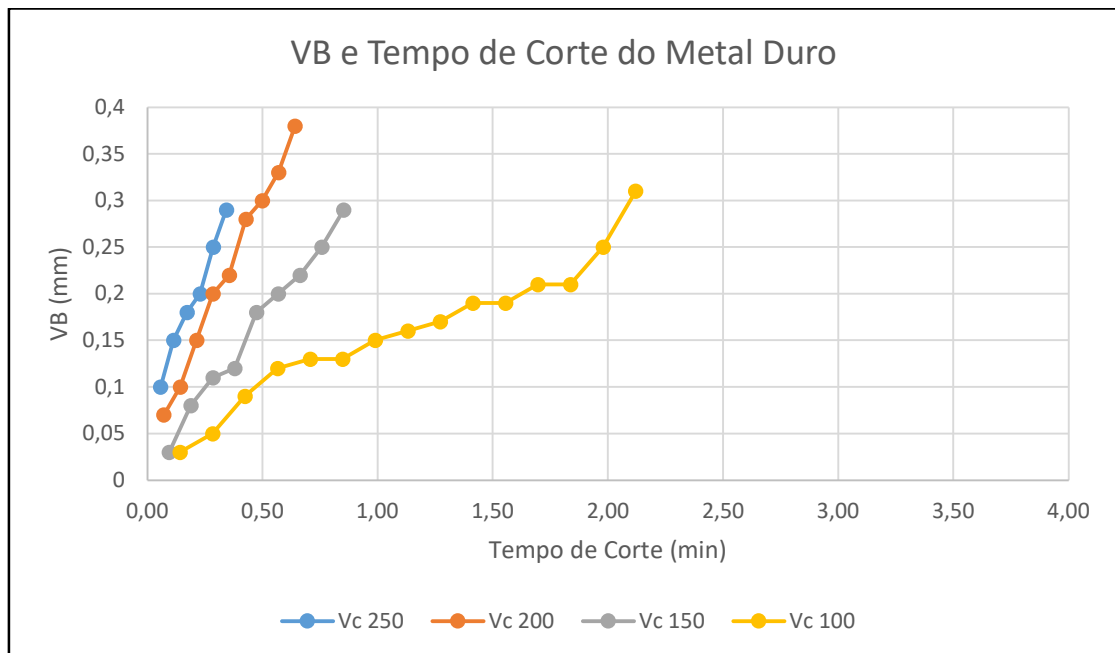
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios referente à evolução dos desgastes, aos mecanismos de desgaste e à vida das ferramentas.

4.1 EVOLUÇÃO DOS DESGASTES

A figura 4.17 apresenta a evolução dos desgastes resultantes dos ensaios com o inserto de Metal Duro. Nota-se que quanto mais elevada a velocidade de corte, mais inclinada é a curva de desgaste da ferramenta. Esse resultado foi semelhante ao evidenciado por Rosa (2017) em seus experimentos, onde os testes com velocidade de corte mais elevadas apresentavam maior inclinação das curvas, em comparação com velocidades de corte mais reduzidas. Nas velocidades de corte de 250, 200 e 150 m/min, praticamente não é possível identificar os três estágios de desgaste padrão das ferramentas apresentado na obra de Machado (1991), pois não há a estabilização da usinagem da ferramenta no estágio II.

Figura 4.17 - Evolução dos desgastes com Metal Duro



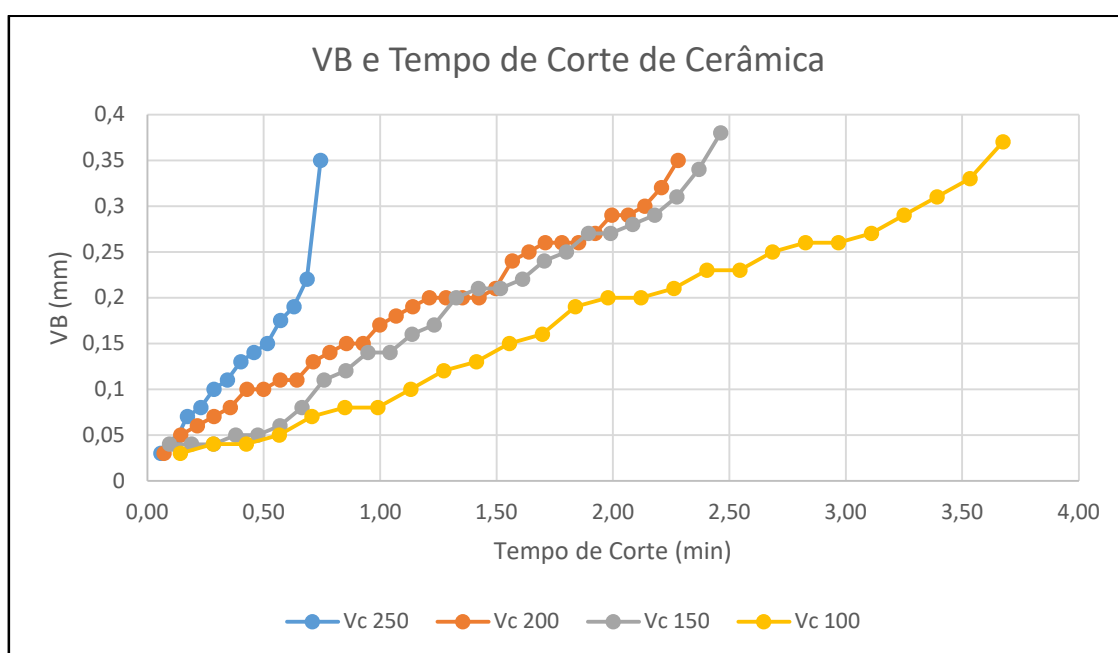
Fonte: Autor

Apenas no teste com a velocidade de corte de 100 m/min foi possível observar um comportamento mais adequado, com estágio I sendo atingido após 0,5 min, seguido por uma

estabilização de estágio II até aproximadamente 1,8 min, e finalizando com o comportamento de estágio III de desgaste mais acentuado. Foi possível também observar, que o critério limite de desgaste VB para esta ferramenta não deve ser maior do que 0,2 mm, visto que em todos os testes, quando ultrapassou este valor, a ferramenta apresentou aumento ainda mais acentuado no desgaste, caracterizando o fim da vida da ferramenta. Este comportamento é evidenciado nos experimentos de Rosa (2017) na usinagem de aço inoxidável AISI 420 C com inserto de Metal Duro.

A figura 4.18 apresenta a evolução dos desgastes para a ferramenta de Cerâmica. Também pode ser verificado que quanto maior a velocidade de corte, maior é a inclinação das curvas de desgaste. Na velocidade de corte de 250 m/min, o desgaste é tão elevado que também não é possível observar claramente os três estágios padrões. Já a partir do teste com velocidade de corte de 200 m/min, podem ser verificadas as regiões de estabilização características do estágio II de forma mais clara antes de um aumento na taxa de evolução característica do estágio III.

Figura 4.18 - Evolução dos desgastes com Cerâmica



Fonte: Autor

Nos experimentos que utilizaram a velocidade de corte de 150 e 100 m/min, a fase I de desgaste não está de acordo com o comportamento esperado e referenciado na literatura, como na obra já citada de Machado (1991), pois a pequena curva ascendente está em sentido contrário do esperado. A hipótese para este comportamento pode ser justificada pelo fato de que as

medições foram realizadas com a lupa, e, portanto, existe uma probabilidade maior de erro de medição para o inserto de coloração mais clara, e também pelo fato de haver um pequeno chanfro na aresta de corte da ferramenta, o que pode dificultar a medição. Este comportamento inesperado, porém, não afeta de forma significativa os resultados dos ensaios. Como pode ser verificado, a velocidade de corte de 100 m/min apresenta evolução mais lenta de desgaste.

Foi observado que mesmo após ultrapassar o limite estabelecido para VB de 0,2 mm, as arestas de cerâmica mantiveram uma certa estabilidade até um VB de aproximadamente 0,3 mm, o que indica que para esta ferramenta, pode ser aumentado o critério de limite para as velocidades de corte de 200, 150 e 100 m/min. A taxa de evolução de desgaste permanece com o mesmo comportamento linear até faixa de 0,3 mm, o que caracteriza com sendo o estágio II da evolução de desgaste, com o estágio III de aumento exponencial sendo evidenciado nos gráficos a partir deste limite maior de VB. Este critério maior de VB pode ser confirmado com o teste do próprio fabricante OVAKO do material das amostras, que em seu catálogo, que apresenta testes de insertos na aplicação de usinagem em seu produto, adotou como limite de VB um valor de 0,4 mm, que é ainda maior do que 0,3 mm. Rebeyka (2016) também menciona como critério de limite um valor até 0,3 mm.

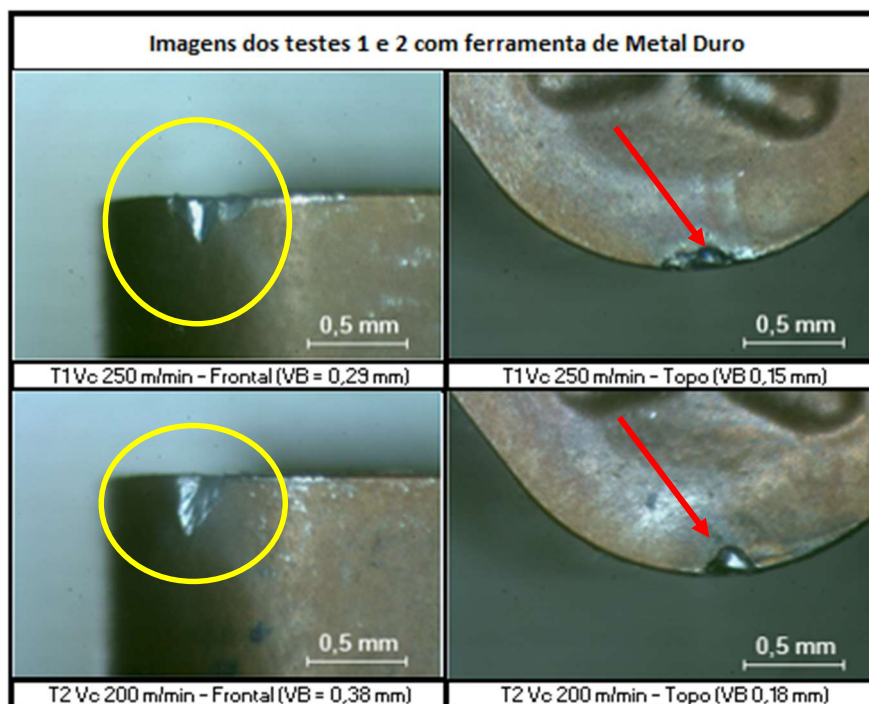
4.2 MECANISMOS DE DESGASTES

Com as análises dos desgastes feitas com auxílio do estereoscópio, foi possível identificar os mecanismos de desgaste nas ferramentas. Nas imagens apresentadas nas Figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22, constam informações a respeito das medidas de VB resultantes em cada aresta ao final dos testes. Para as arestas do inserto de Metal Duro, a Figura 4.19 apresenta imagens dos testes T1 e T2 com velocidade de corte de 250 e 200 m/min.

Nestes testes ocorreram mecanismos de abrasão seguido de adesão de contato, conforme pode ser visualizado nas imagens de topo sinalizadas pelas setas em vermelho, e pelos círculos amarelos nas imagens frontais. O aspecto brilhoso nas regiões desgastadas é característica do material aderido na ferramenta. Este fator é justificado pelos esforços elevados e interações das superfícies inferiores do cavaco e a face da ferramenta, que se soldam por adesão, conforme König e Klocke (1997), condições geradas pela velocidade de corte elevada para a aplicação dos insertos de Metal duro. Nas imagens frontais das arestas, destacam-se por círculos em amarelo as regiões onde ocorreram os maiores desgastes, que segundo Trent e Wright (2000),

são influenciadas pelas interações com a atmosfera. O mecanismo de abrasão com adesão ficou evidente para estas configurações de teste.

Figura 4.19 - Desgastes dos testes T1 e T2 da Ferramenta 1



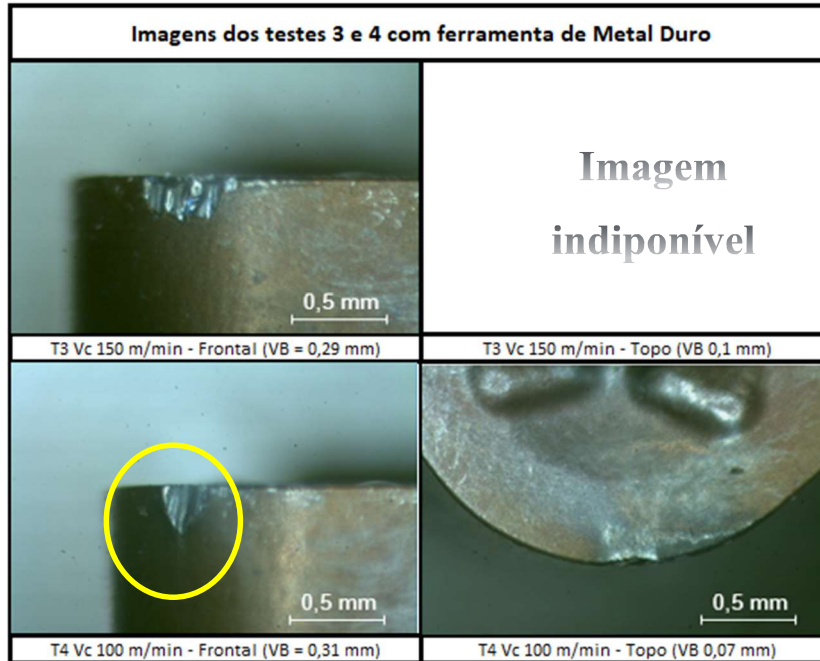
Fonte: Autor

Abbruzzini (2019) em seu estudo de mecanismos de desgaste no torneamento de Inconel 718 endurecido obteve resultados de adesão de contato, provavelmente devido às afinidades do cromo, níquel e ferro na usinagem. Essa aderência de contato também pode ser justificada pela presença do cromo na camada superficial externa, utilizando ferramentas de metal duro em velocidades de corte elevadas, após a remoção do revestimento do inserto que deixa o substrato exposto.

Para os testes T3 e T4 com velocidades de corte de 150 m/min e 100 m/min, é possível observar na Figura 4.20, que o mecanismo de desgaste predominante foi abrasão, principalmente na velocidade de corte de 100 m/min. Com o corte sendo executado com temperaturas mais baixas, é esperado que tenha menor probabilidade de ocorrer a adesão de contato que ocorre com velocidades de corte mais elevadas. O GPC não ocorreu porque, conforme Ferraresi (1970) e Rebeyka (2016), apenas aparece em velocidades de corte muito mais baixas do que aplicado nos ensaios, na ordem de 60 m/min ou menos. Na imagem frontal da aresta utilizada para usinagem com velocidade de corte de 100 m/min, é possível observar o

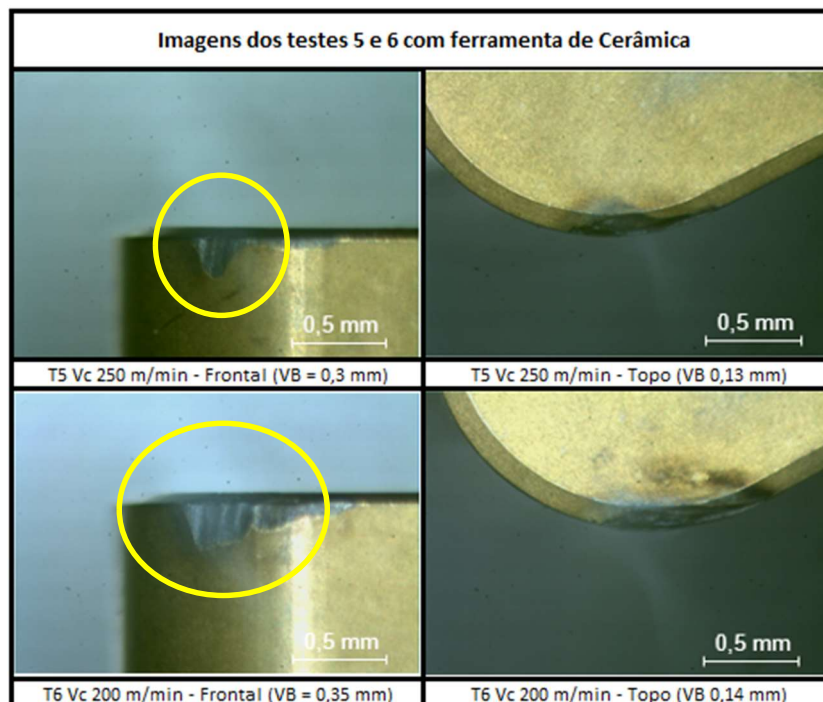
tipo de desgaste de entalhe muito semelhante ao apresentado por Machado (1991), que está em outras arestas.

Figura 4.20 - Desgastes dos testes T3 e T4 da Ferramenta 1



Fonte: Autor

Figura 4.21 - Desgastes dos testes T5 e T6 da Ferramenta 2

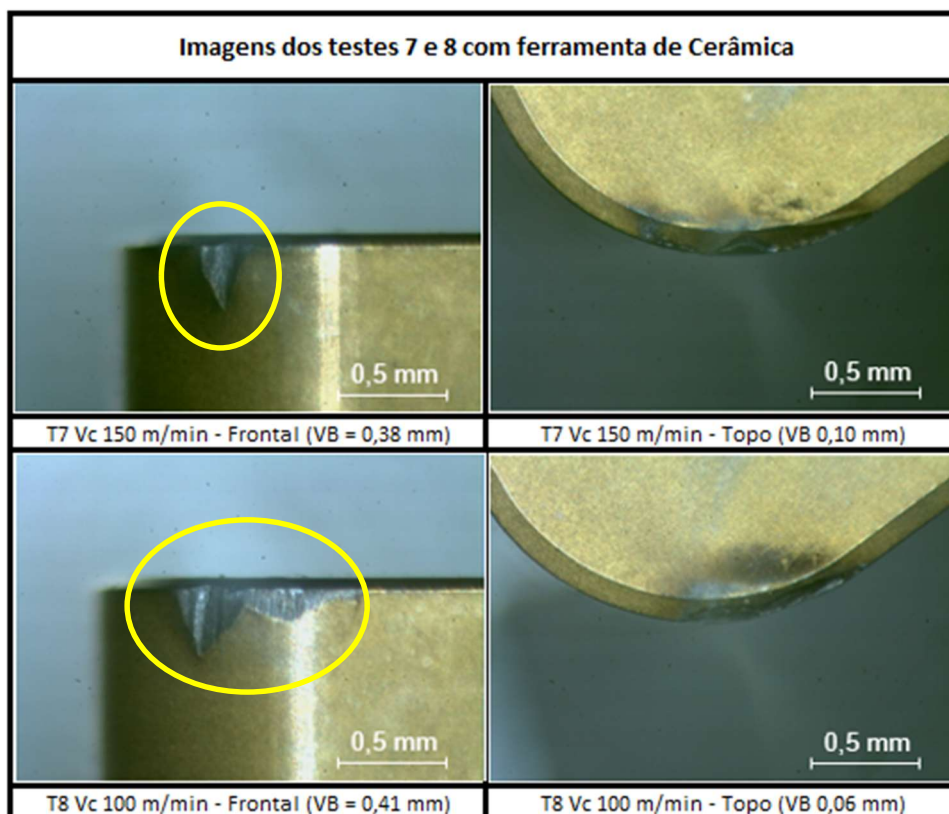


Fonte: Autor

Nas imagens 4.21 e 4.22 são apresentadas fotos dos testes com inserto de cerâmica. Foi possível observar que em nenhum dos casos ocorreu o mecanismo de adesão evidenciado em algumas condições do Metal Duro.

O mecanismo característico para os ensaios com cerâmica foi de abrasão, estando de acordo com os testes realizados por Campos (2004), com o qual obteve resultados semelhantes utilizando cerâmica para usinagem de aço ABNT 5140 endurecido com 58 HRC. Conforme destacado com os círculos amarelos nas figuras 4.21 e 4.22, o tipo de desgaste é o de entalhe, e é semelhante ao resultado encontrado por Machado (1990) neste mesmo tipo de aplicação, ilustrado no referencial teórico pela Figura 2.9. O desgaste de entalhe em insertos de cerâmica também foi encontrado por Khamseh-zadeh (2001) em usinagem de aços endurecidos.

Figura 4.22 - Desgastes dos testes T7 e T8 da Ferramenta 2



Fonte: Autor

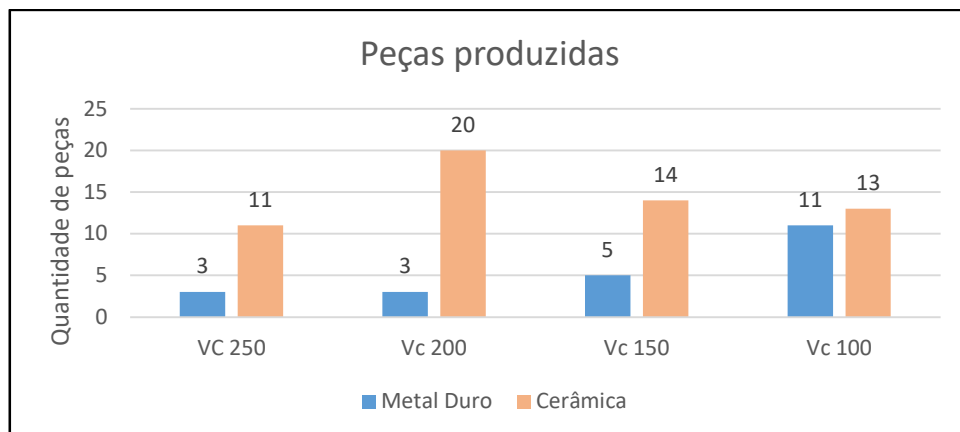
O desgaste de entalhe ocorre nas regiões onde prevalecem as condições de escorregamento do mecanismo de abrasão, conforme citado por Trent e Wright (2000), e que são encontrados na usinagem de materiais endurecidos. Apresenta um formato semelhante a um “V” e aumenta em comprimento e largura conforme as condições de profundidade,

geometria da ferramenta e parâmetros de corte. Nas imagens frontais é possível observar que o entalhe apresenta uma inclinação menor do centro para a direita, do que do centro para a esquerda, e isso é justificado pela direção da usinagem, desgaste gradual dos insertos e pela geometria das ferramentas, que no formato “W” tem um ângulo de saída pequeno. A ferramenta de cerâmica apresenta um chanfro na aresta de corte, como pode ser verificado nas imagens. Para os testes com velocidades de corte elevadas, não houve o mecanismo de difusão na ferramenta de Metal Duro devido a sua composição e o tipo de revestimento. Pode ser verificado que não houve formação de desgaste do tipo cratera, que é a principal evidência do mecanismo difusivo, conforme Groover (1987). Para o inserto de cerâmica, a difusão não ocorre devido a sua composição que não favorece este tipo de fenômeno.

4.3 VIDA DAS FERRAMENTAS

Com o critério limite de 0,2 mm estabelecido para VB, obteve-se os resultados de quantidade de peças produzidas em cada aresta de corte testada. Com os valores apresentados na figura 4.23, pode ser verificado que a maior quantidade de peças usinadas com o inserto de Metal Duro foi na condição de 100 m/min de velocidade de corte (teste T4), com um total de 11 amostras. Esse resultado está de acordo com o limite de 10 peças estabelecido pelo processo atual utilizado na empresa parceira, que utiliza este tipo de ferramenta com os parâmetros aplicados no teste T4. Boing (2016) obteve resultados baixos com opções de metal duro revestido aplicado em aço AISI 4340 com endurecimento superior a 50 HRC, o que está de acordo com os resultados.

Figura 4.23 - Vida das Ferramentas



Fonte: Autor

Em todas as configurações de usinagem testadas, as arestas de cerâmica produziram mais peças do que as arestas do inserto de Metal Duro. O menor desempenho do inserto de cerâmica, foi na condição de 250 m/min de velocidade, com 11 peças sendo produzidas dentro do limite de 0,2 mm de desgaste, e o melhor desempenho foi na condição de 200 m/min com a usinagem de 20 hastes. Nota-se que o menor resultado obtido na ferramenta de cerâmica é o mesmo do melhor resultado obtido com o inserto de Metal Duro (11 peças), porém com velocidade de corte muito maior.

As quantidades de peças obtidas nos ensaios com V_c de 150 m/min e 100 m/min foram menores do que o resultando no ensaio com V_c de 200 m/min, considerando o critério estabelecido. Com velocidades de corte menores, o mecanismo de abrasão fica mais atuante, influenciado por um aumento de temperatura na região de corte, o que aumenta o desgaste.

4.4 TEMPOS E CUSTOS DE USINAGEM

Após realização dos testes, foram calculados e analisados os tempos de produção resultantes em cada aplicação. A tabela 6 apresenta os tempos de usinagem das peças conforme a velocidade de corte, considerando o diâmetro de 45 mm (0,045 m) e o comprimento de usinagem de 15 mm (0,015 m). O volume de produção anual é de 20800 peças, e o tempo de troca de cada aresta é de aproximadamente 1 minuto. Com essas informações foi possível calcular o tempo de usinagem do volume de peças anual, considerando o tempo de troca de arestas após desgaste e fim de vida da ferramenta.

Tabela 6 - Tempos de Usinagem por peça

Testes	V_c (m/min)	Comp. Usinado (m)	Tempo/peça (min)
T1 e T5	250	0,015	0,057
T2 e T6	200	0,015	0,071
T3 e T7	150	0,015	0,095
T4 e T8	100	0,015	0,141

Fonte: Autor

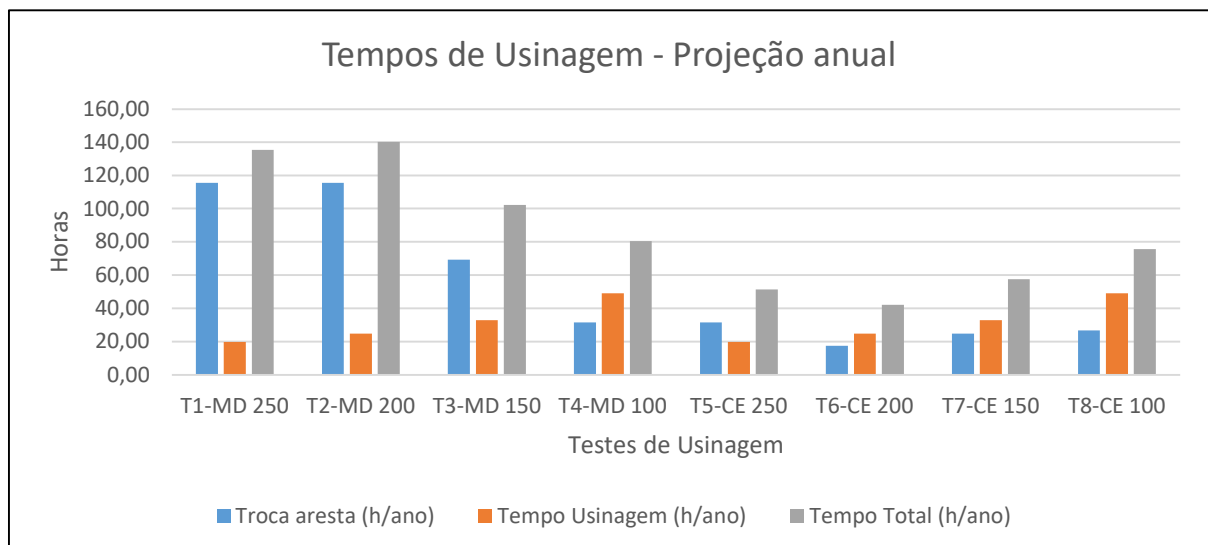
Na tabela 7 são apresentados os tempos relacionados com as trocas de arestas dos insertos estimadas para a demanda anual, assim como o tempo de usinagem da máquina em operação neste período. Neste cálculo estão consideradas informações da quantidade de peças produzidas dentro do limite de VB, e o número de arestas (6) para cada teste. Relacionando com a demanda anual, os valores seguem conforme informados na tabela 7 e expostos na figura 4.24 para melhor visualização.

Tabela 7 - Estimativa anual de tempos na aplicação dos testes

Teste de Usinagem	Vc	Tempo Trocas de arestas	Tempo Usinagem	Tempo Total
	m/min	h/ano	h/ano	h/ano
T1 – MD	250	115,56	19,82	135,37
T2 – MD	200	115,56	24,68	140,24
T3 – MD	150	69,33	32,83	102,16
T4 – MD	100	31,52	48,98	80,50
T5 – CE	250	31,52	19,82	51,33
T6 – CE	200	17,33	24,68	42,02
T7 – CE	150	24,76	32,83	57,59
T8 – CE	100	26,67	48,98	75,65

Fonte: Autor

Figura 4.24 - Tempos de Usinagem por ano em cada teste



Fonte: Autor

Em relação apenas aos tempos de operação de usinagem, os testes T1 e T5 que são realizados com velocidade de corte mais elevada (250 m/min) resulta em menor tempo de operação de máquina, porém os tempos de troca de arestas devido ao fim de vida da ferramenta são maiores. No caso do teste T1, onde cada aresta do inserto produz apenas 3 peças antes do fim de vida útil, a quantidade de trocas de ferramentas é tão grande que o tempo mais significativo é o de troca das ferramentas. Na maioria dos testes, este tempo de troca de arestas se torna mais significativo do que o tempo de usinagem.

O teste T6, com aplicação de inserto de cerâmica na velocidade de corte de 200 m/min obteve menor estimativa total de tempo dentre todos os testes, muito influenciado pelo menor tempo estimado para troca de arestas, visto que obteve o melhor rendimento em função da quantidade de peças (20) usinadas até o fim da vida da ferramenta. E além disso, a usinagem com velocidade de corte de 200 m/min produz a peça em tempo de operação mais baixo comparado com os demais testes, sendo superado apenas para as aplicações com 250 m/min aplicadas nos testes T1 e T5.

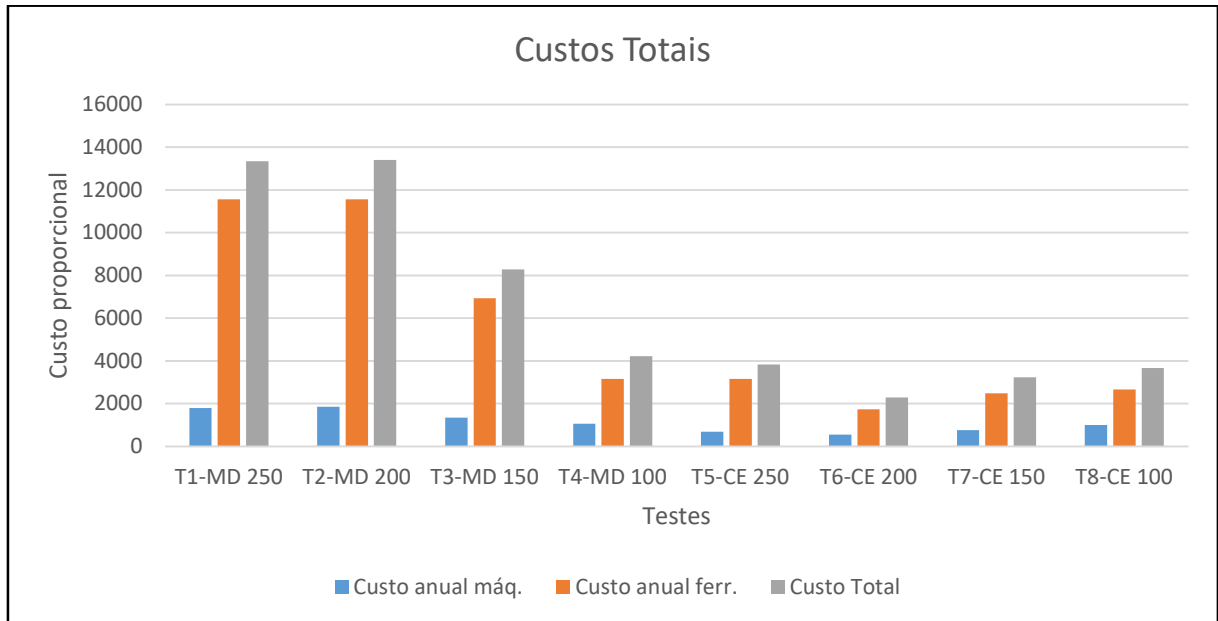
Para calcular os custos relacionados com os resultados dos testes, foram aplicados valores proporcionais para o custo por hora da máquina, o valor das ferramentas testadas e o volume anual de hastes (20800 peças). Os custos foram considerados com o valor 10, adotado como referência para a ferramenta 1 de Metal Duro. E o valor de 13,2 proporcional para custo da máquina por hora. De início foi considerado o valor da ferramenta 2 como sendo o mesmo da ferramenta 1, com os valores sendo apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Custos proporcionais envolvidos em cada tese

Teste	Vc	Custo máquina	Custo Ferramenta	Custo Total
	m/min	\$ simb./ano	\$ simb./ano	\$ simb./ano
T1 – MD	250	1.787	11.556	13.342
T2 – MD	200	1.851	11.556	13.407
T3 – MD	150	1.349	6.933	8.282
T4 – MD	100	1.063	3.152	4.214
T5 – CE	250	678	3.152	3.829
T6 – CE	200	555	1.733	2.288
T7 – CE	150	760	2.476	3.236
T8 – CE	100	999	2.667	3.665

Fonte: Autor

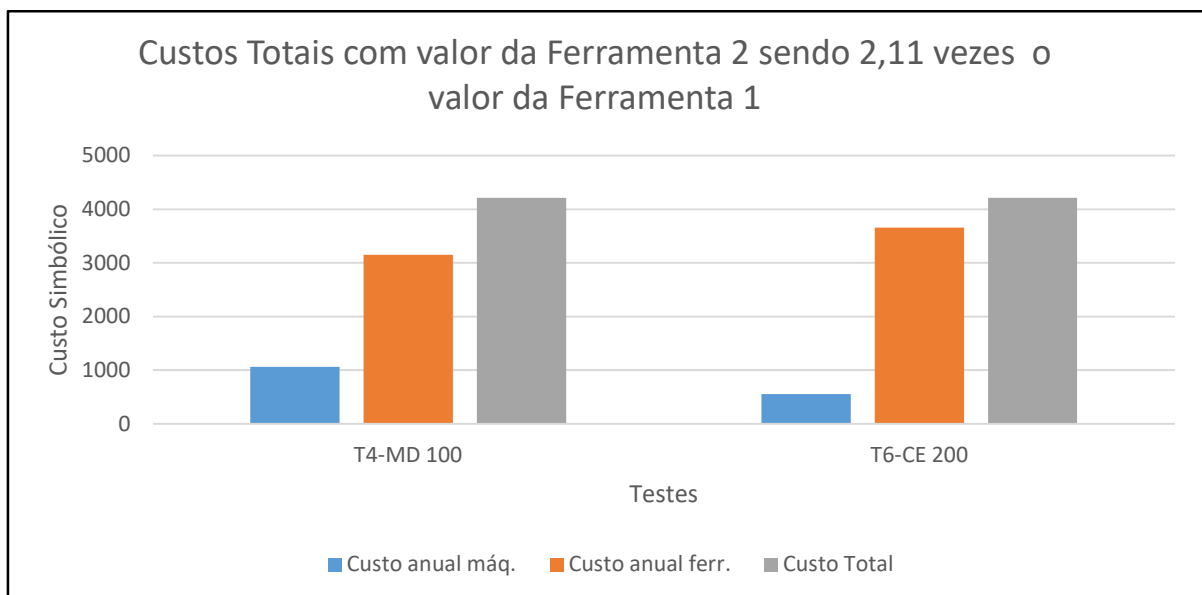
Figura 4.25 - Custos proporcionais totais para cada teste



Fonte: Autor

Considerando os custos de ferramenta 1 e 2 como sendo iguais, pode ser verificado que em um período de 1 ano, a condição mais viável financeiramente foi a aplicação do Teste 6 com inserto de cerâmica e velocidade de corte de 200 m/min. Principalmente por ser necessário menor tempo total, considerando as trocas de ferramentas e as operações de usinagem em cada peça.

Figura 4.26 - Custo Total com valor de cerâmica 2,11 vezes maior do que Metal Duro



Fonte: Autor

A ferramenta 2 aplicada com as condições do teste T6 e limite de VB de 0,2 mm é mais viável em relação ao custo total até um limite máximo de 2,11 vezes o valor do inserto de Metal Duro. Figura 4.26. Considerando VB de 0,3 mm para aplicação com cerâmica, a condição limite máximo aumenta para 3,06 vezes.

4.5 CONCLUSÕES FINAIS

O melhor resultado obtido para o inserto de Metal Duro foi no teste T4 com velocidade de corte de 100 m/min, com 1,55 minutos de usinagem e produção de 11 peças. O mecanismo de desgaste nesta condição é abrasão com tipo de entalhe. Para o inserto de cerâmica, o resultado mais satisfatório foi obtido no teste T6, com velocidade de corte de 200 m/min, 1,5 minutos de usinagem e produção de 20 peças.

Comparando as duas aplicações, obteve-se resultados importantes para auxiliar na escolha da ferramenta mais adequada para utilizar no processo. A ferramenta de cerâmica apresenta um aumento de 11 para 20 (82%) na quantidade de peças usinadas por aresta. O tempo de operação das duas ferramentas ficou semelhante, com a vida da ferramenta em torno de 1,55 minutos para o metal duro e 1,57 minutos para o inserto de cerâmica. Caso o critério de VB para a ferramenta de cerâmica aumente de 0,2 mm para 0,3 mm, os valores são ainda mais significativos, com aumento de 11 para 28 (155%) na quantidade de peças, e vida da ferramenta aumentando de 1,57 minutos para 2,14 minutos (36,3%). Em termos de tempo de usinagem, a velocidade de corte de 100 m/min apresenta um ciclo de 8,478 segundos de usinagem na região de aplicação, sendo que com 200 m/min, o ciclo reduz para 4,272 segundos (redução de 49,56%).

Analisando esses resultados, a ferramenta 2 (BNC2020) de cerâmica fica indicada para substituir a ferramenta 1 (TH-1000) de Metal Duro, pelo fato de produzir uma quantidade de 82% a 155% maior de peças, apresentar vida da ferramenta com acréscimo de até 36,3%, e produzir peças em tempo ciclo 49,56% menor, resultando em ganho de produtividade e conseqüentemente redução de custo de operação, com aumento de disponibilidade de máquina. Em relação aos custos totais, a condição mais viável é a do teste 6 com ferramenta de cerâmica, desde que o valor do inserto não seja maior do que 2,11 vezes a ferramenta 1 de Metal Duro. Se for aumentado o limite de VB para 0,3 mm na aplicação de cerâmica, a ferramenta 2 é indicada para a aplicação no processo produtivo com o custo sendo até 3,06 vezes o preço da

ferramenta 1. Se o valor da ferramenta 2 exceder esse valor de proporção, deve ser mantido a aplicação que utiliza Metal Duro nas condições do teste T4.

4.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados obtidos, fica recomendado a continuação dos estudos envolvendo o processo de torneamento de superfícies endurecidas de aço, com testes de usinagem com utilização de ferramentas, afim de avaliar opções de otimização dos processos. É considerado importante comparar desgastes e vida útil com outras classes de insertos de metal duro, cerâmica, CBN ou, até mesmo, outros materiais que estão sendo desenvolvidos. Além disso, outras opções de geometria de ferramentas podem apresentar resultados ainda melhores, assim como as aplicações de outras configurações de parâmetros de corte. Importante também observar as relações de custos das ferramentas, pois se tiverem diferenças muito elevadas, precisam ter rendimento muito mais significativos para justificar uma melhoria de processo com troca de ferramentas aplicadas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGUIAR, Herbert Cesar Gonçalves de. **Contribuição ao estudo do torneamento do aço inoxidável superduplex empregando ferramentas de metal duro com revestimentos**. Orientador: Dr. Amauri Hassui. 2012. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ABBRUZZINI, Lucas Rodrigues. **Estudos de Mecanismos de desgaste em ferramenta de diamante policristalino no torneamento do Inconel 718 endurecido**. Orientador: Dr. Wisley Franco Sales. 2019. 54 p. Projeto de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

BRAGA, Marcela Dalprat Alegre. **Avaliação do tipo de desgaste de ferramenta de um compósito cerâmico de alumina-zircônia para usinagem de ligas metálicas de uso aeroespacial**. Orientador: Drs. Maria do Carmo de Andrade Nono, Miguel Adriano Inácio, Irineu dos Santos Yassuda. 2017. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - INPE, São José dos Campos, 2017.

BOING, Denis. **Transição da aplicação do Metal duro revestido e do PCBN de aços endurecidos em função da dureza e do teor de carbonetos**. Orientador: Rolf Bertrand Schroeter. 2016. 287 p. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CAMPOS, L.A. **Otimização do Processo de Torneamento de Peças Endurecidas por meio da Definição do Intervalo de Máxima Eficiência da Velocidade de Corte**, Dissertação de Mestrado, PUC-MG, fevereiro, Belo Horizonte, MG, 115 pgs, 2004.

CHALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7.ed.rev.e aum. São Paulo: ABM, 2008. 599 p. ISBN 8586778486

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Franciso Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7.ed.rev.São Paulo: Artliber, 2010. 268 p. ISBN 8587296019

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1.ed. [S. l.]: Edgard Blucher, 1970. 801 p. ISBN 9788521214199. *E-book*.

FRACARO, Janaina. **Fabricação pelos Processos de Usinagem e meios de controle**. 1. ed. Curitiba: Intersaberes, 2017. 342 p. ISBN 9788559724899. *E-book*.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 4. ed. USA: John Wiley and Sons, 1987. 1014 p. ISBN 9780470467002.

HUTCHINGS, I.M., **Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials**, Published by Edward Arnold, London, ISBN 0 340 56184 X, 273 pgs, 1992

ISO 3685, 1977, **Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools.**

KHAMSEHZADEH, H., **Behaviour of Ceramic Cutting Tools when Machining Superalloys**, PhD Thesis, University of Warwick, Coventry, England, 239 pgs, 2001.

KARTHA, Aravind; SUBRAMANIAN, Sravan. **Turning of Steel: Study on the effect of insert grade and enthering angle on tool life.** 2020. 42 p. Dissertação (DEGREE PROJECT IN MECHANICAL ENGINEERING) - KTH ROYAL INSTITUTE OF TECNHOLOGY, Suécia, 2020.

KÖNIG, W. und KLOCKE, F., 1997, **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen und Bohren**, Springer-Verlag, Berlim – Heidelberg, 5 Auflage, Band 1, 471 pgs, 1997

MACHADO, A.R., 1991 **Condições da Interface Cavaco-Ferramenta. Parte I: Generalidades**, XI COBEM 11 a 13 de dezembro, São Paulo SP, pp. 381-84, 1991

MACHADO, A.R., 1990, **Machining of Ti6Al4V and Inconel 901 with a High Pressure Coolant System**, PhD Thesis, University of Warwick, Coventry, England, September, 288 pgs, 1990

OGNIBENE HIDROSTÁTICA LTDA. Disponível em: <https://www.ognibene.com/>. Acesso em: 5 out. 2020.

OVAKO. Disponível em: <www.ovako.com> Acesso em: 10 nov. 2020.

REBEYKA, Claudimir José. **Princípios dos Processos de Fabricação por Usinagem**. 1. ed. Curitiba: Intersabers, 2016. 292 p. ISBN 9788559720396. *E-book*.

ROSA, Guilherme Cortelini da. **Estudo da Usinabilidade do Torneamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420 C endurecido com ferramenta de Metal Duro**. Orientador: André João de Souza. 2017. 121 p. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SANDVIK. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/pages/default.aspx>> Acesso em 10 nov. 2020.

SECO. Disponível em: <www.secotools.com> Acesso em 18 nov. 2020.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I**. 6. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. 249 p.

SUMITOMO ELETRIC GROUP. Catálogo de Ferramentas de Corte: **Ferramentas de corte de alto desempenho**, 2018-2020. Campinas, 2018

TRENT, E.M. **Metal Cutting**. 3. ed. atual. London: Butterworth, 1991. 271 p. ISBN 0750610689.

ANEXO 1

Programação CNC de referência

```
%  
O7799 (TESTE DE INSERTOS DE DESBASTE)  
M53  
(COMP. FORA DA PLACA 110.00)  
N2  
M5  
G28U0  
G92S2500  
G52Z0  
G10G90P0X0Z0  
G10G90L2P0X0Z0  
G10L2P1X0Z272.  
G28G90U0  
T299G54 (WNMG R1.2 TH1000)  
G97S714M4  
G0G90G54Z50  
G0X47.Z5.  
M8  
G96S100 (VELOCIDADE DE CORTE)  
G1X45.15F.25  
G1X44.60Z0.F.1 (PROFUNDIDADE DE CORTE)  
G1X44.60Z-15.00F.15 (AVANCO)  
G1X47.F.5  
T288  
G0X300.Z200.  
M5  
G28U0  
T303  
M35  
M54  
M9  
M52  
M30  
%
```