

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE INSERTOS DE METAL DURO NO
FRESAMENTO DO AÇO AISI O1 TEMPERADO E REVENIDO**

JOSÉ DE ARIMATÉIA B. B. SOBRINHO

MANAUS

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE INSERTOS DE METAL DURO NO
FRESAMENTO DO AÇO AISI O1 TEMPERADO E REVENIDO**

JOSÉ DE ARIMATÉIA B. B. SOBRINHO

Trabalho apresentado à banca examinadora da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Sidney Oliveira Lins

Co-orientador: Prof. Dr. Laurence Colares Magalhães

MANAUS

2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B574a Bezerra Sobrinho, José de Arimatéia Barbosa
Avaliação do desgaste de insertos de metal duro no fresamento
do aço AISI 01 temperado e revenido / José de Arimatéia Barbosa
Bezerra Sobrinho . 2021
65 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Sidney de Oliveira Lins
Coorientador: Laurence Colares Magalhães
TCC de Graduação (Engenharia Mecânica) - Universidade
Federal do Amazonas.

1. Usinagem. 2. Fresamento. 3. Desgaste de ferramentas. 4.
Metal duro revestido. 5. Aço endurecido. I. Lins, Sidney de Oliveira.
II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

JOSÉ DE ARIMATÉIA B. B. SOBRINHO

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE INSERTOS DE METAL DURO NO
FRESAMENTO DO AÇO AISI O1 TEMPERADO E REVENIDO**

Trabalho apresentado à banca examinadora da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Sidney de Oliveira Lins (Presidente)
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Laurence Colares Magalhães
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. MSc. Giovani Conrado Carlini
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Antônio do Nascimento Silva Alves
Universidade Federal do Amazonas

MANAUS

2021

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu saúde para finalizar este trabalho;

A minha mãe, que é a pessoa mais importante de minha vida.

A meu pai, por todo o apoio e carinho;

A minha tia, por todo o apoio e incentivo;

Ao meu orientador por toda a atenção e por todo auxílio;

Ao meu coorientador, por todo o aprendizado, e que se fez presente até esta etapa final de minha graduação;

Aos professores pelo conhecimento e experiência transmitidos ao longo desses anos;

A todos os meus amigos, que me acompanharam durante toda esta jornada;

Aos amigos do laboratório de usinagem da Universidade Federal do Amazonas, por toda a atenção e disponibilidade.

RESUMO

A usinagem de materiais endurecidos é uma tarefa difícil. Elevados esforços de corte, e vida útil da ferramenta são alguns dos principais pontos a serem considerados em relação a este tipo de processo. No que diz respeito a vida da ferramenta, a seleção adequada dos parâmetros de corte se torna uma prioridade. Com efeito, a velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia a vida útil de uma ferramenta. Neste trabalho é avaliado o desgaste de insertos de metal duro revestidos com TiAlCrN no fresamento de topo do aço AISI O1 temperado e revenido a 57HRC. Os melhores resultados foram obtidos para uma faixa de velocidade de corte de 50 m/min , onde maior vida útil do ferramental foi obtida. A faixa de velocidade de corte limite para o processo resultou em 80 m/min , onde lascamentos excessivos e a quebra da ferramenta são verificados.

Palavras-chave: Usinagem, Fresamento, Desgaste de ferramentas, Metal duro revestido, Aço endurecido.

ABSTRACT

Hard machining is a difficult task. High cutting forces and tool life are some of the main points to be considered in relation to this type of process. As far as tool life is concerned, the proper selection of cutting parameters becomes a priority. Cutting speed is the parameter that most influences the life of a tool. In this work, the wear of TiAlCrN coated carbide inserts in the end milling of AISI O1 steel tempered and quenched at 57HRC is evaluated. Best results were obtained for a cutting speed range of 50 *m/min*, where longer tool life has been obtained. The limiting cutting speed range for the process is 80 *m/min* where excessive chipping and tool breakage are checked.

Keywords: Tool wear, coated carbide, AISI O1.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Classificação dos processos de fabricação	14
Figura 2.2 - Fresamento Tangencial e Fresamento Frontal	16
Figura 2.3 - Fresamento Discordante e Concordante	17
Figura 2.4 - Avanço por dente (f_z) e Avanço efetivo (f_e)	17
Figura 2.5 - Velocidade de corte, velocidade de avanço e velocidade efetiva no fresamento	18
Figura 2.6 - Profundidade de corte a_p e Espessura de penetração (a_e)	19
Figura 2.7 - Geometria das ferramentas de corte.....	21
Figura 2.8 - Tipos de desgaste em ferramentas de corte	28
Figura 2.9 - Tipos de desgaste de ferramenta.....	29
Figura 2.10 - Curvas de desgaste: (a) Curva de desgaste casual, (b) Evolução do desgaste de flanco VBB em função do tempo de corte para diferente velocidades de corte	30
Figura 2.11 - Exemplo de desgaste de flanco para um inserto de diamante CVD na usinagem de MMC	31
Figura 2.12 - Curvas de desgaste para várias velocidades de corte (V_1 , V_2 e V_3) (a) e curva de vida (b).....	32
Figura 2.13 - Mecanismos de desgastes presentes nas ferramentas de corte em função da temperatura de corte	34
Figura 2.14 - Mecanismo de difusão ocorrido na superfície de saída da ferramenta	35
Figura 2.15 - Mecanismo de abrasão na ferramenta de corte.....	35
Figura 2.16 - Ferramenta com APC na aresta de corte.....	36
Figura 2.17 - Desgaste por oxidação do gume de corte da ferramenta	37
Figura 2.18 - Cadeias tecnológicas para o processo de produção convencional (a) e processo de produção com operações de usinagem endurecida (b)	39
Figura 3.1 - Fluxograma do ensaio de avaliação do desgaste de ferramenta	42
Figura 3.2 - Dimensões da peça de trabalho.....	43
Figura 3.3 - Representação esquemática do perfil de dureza do material ensaiado.	43
Figura 3.4 - Geometria do Inseto.....	44
Figura 3.5 - Geometria do Porta-Ferramenta	45
Figura 3.6 - Centro de Usinagem CNC ROMI D800.....	46

Figura 3.7 - Sistema óptico de medição OLM 3020 Hexagon	46
Figura 3.8 - Imagem retirada de Software CAD/CAM NX10 do percurso da fresa durante o corte do aço AISI01.....	47
Figura 4.1 - Curvas de desgaste de 60 m/min, 80 m/min e 100 m/min em função de L	52
Figura 4.2 - Curvas de desgaste de 60 m/min, 80 m/min e 100 m/min em função de τ_m	53
Figura 4.3 - Resultados dos ensaios de vida útil com VBB max = 0,5mm	54
Figura 4.4 - Curvas de desgaste de 50m/min em função de L	55
Figura 4.5 - Curvas de desgaste de 50m/min em função de τ_p	57
Figura 4.6 - Desgaste na superfície de saída.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Recomendações utilizadas na prática industrial para o limite de desgaste de flanco VB_B para vários materiais de ferramentas.....	31
Tabela 2.2 - Valores de n observados na prática para vários materiais de ferramentas de corte.....	33
Tabela 3.1 – Valor de dureza do aço AISI01 ao longo dos pontos de impressão.....	44
Tabela 3.2 – Composição química do Aço Liga VND (AISI O1).....	44
Tabela 3.3 – Dimensões do Inserto.....	44
Tabela 3.4 – Dimensões do suporte.....	45
Tabela 3.5 – Parâmetros do movimento de entrada da fresa no plano de trabalho....	48
Tabela 3.6 – Parâmetros de corte para ensaio de vida útil da ferramenta.....	48
Tabela 3.7 – Parâmetros de corte para segunda etapa do ensaio de vida da ferramenta.....	49
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de vida útil de ferramenta com $VB_B \text{ max} = 0,5\text{mm}$	50
Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de vida útil de ferramenta com $VB_B \text{ max} = 0,8\text{mm}$	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

f	Avanço
f_z	Avanço por dente
f_e	Avanço de corte efetivo
v_c	Velocidade de corte
v_f	Velocidade de avanço
v_e	Velocidade efetiva de corte
D	Diâmetro da fresa
n	Rotação
Z	Número de dentes
f_z	Avanço por dente
a_p	Profundidade de corte
a_e	Espessura de penetração
ISO	International Organization for Standardization
A_Y	Face ou Superfície de saída
A_a	Flanco ou Superfície de folga
A_a'	Superfície secundária de folga
S	Gume principal de corte
S'	Gume secundária de corte
Co	Cobalto
TiC	Carboneto de titânio
TaC	Carboneto de tântalo
PVD	Physical Vapor Deposition
CVD	Chemical Vapor Deposition
Al_2O_3	Oxido de alumínio
TiN	Nitreto de titânio
VB_B	Desgaste médio de flanco
VB_Bmax	Desgaste localizado de flanco
τ_m	Tempo de corte
L	Comprimento total de corte
VB_{BC}	Desgaste de ferramenta permitido
C	Constante
APC	Aresta postiça de corte
SEM	Microscopia eletrônica de varredura
WC	Carboneto de tungstênio
W	Tungstênio
TiAlSN	Nitreto de alumínio titânio
RSM	Modelagem por superfície de resposta
m/min	Metro por minuto
τ_p	Tempo parcial de corte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo	11
1.2	Organização do trabalho	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Usinagem	13
2.1.1	Fresamento	14
2.1.2	Características e parâmetros do processo	17
2.2	Ferramentas de corte	19
2.2.1	Geometria da ferramenta	20
2.2.2	Materiais de ferramenta de corte	22
2.2.3	Revestimentos de ferramentas de corte	24
2.3	Desgaste de ferramenta	27
2.3.1	Evolução de desgaste de ferramenta	29
2.4	Fórmula de Vida da Ferramenta de Taylor	32
2.5	Mecanismos de desgaste de ferramenta	34
2.5.1	Difusão	34
2.5.2	Abrasão	35
2.5.3	Adesão	36
2.5.4	Oxidação	37
2.6	Usinagem de materiais endurecidos	38
2.7	Estado da Arte	39
3	METODOLOGIA	42
3.1	Material usinado	42
3.2	Ferramenta de corte	44
3.3	Equipamentos	45
3.4	Procedimento	47

3.4.1	Ensaio com critério de fim de vida de $VBB_{max} = 0,5mm$	48
3.4.2	Ensaio com critério de fim de vida de $VBB_{max} = 0,8mm$	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Resultados dos ensaios de vida útil de ferramenta com $VBB_{max} = 0,5mm$	50
4.2	Resultados dos ensaios de vida útil de ferramenta com $VBB_{max} = 0,8mm$	54
5	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo utilizado na fabricação de componentes voltados aos diversos setores industriais. Estima-se que em torno de 15 a 20% de todo o aço produzido no mundo seja transformado e removido por usinagem na forma de cavaco. A tendência mundial da indústria de usinagem é produzir peças complexas com dimensional/tolerância geométrica bem definidos, acabamento superficial esmerado, baixo custo e sem poluir o meio ambiente (ALMEIDA, 2010).

Visto que o desgaste excessivo em ferramentas de corte causa distorções dimensionais e de acabamento nas peças, além de provocar custos adicionais, este se torna, portanto, um dos principais desafios quando se trata de usinagem. As trocas de ferramentas ocorrem devido à quebra e ao desgaste excessivo, onde muitas vezes há uma quebra inesperada ou o desgaste excessivo prematuro. Por outro lado, em alguns casos, troca-se a ferramenta quando ainda há condições efetivas de corte devido a uma estimativa média de algum fator relacionado ao fim de vida da ferramenta, como um tempo de usinagem, comprimento de corte, dentre outros (VITÓRIA, 2016).

O desenvolvimento progressivo de qualquer desgaste da ferramenta possui uma complexa inter-relação com todos os parâmetros de corte, seja esse parâmetro a velocidade de corte, taxa de avanço ou profundidades de corte. Na prática, a velocidade de corte é a principal preocupação quando se considera o desgaste da ferramenta. Como tal, as curvas de desgaste da ferramenta são construídas para diferentes velocidades de corte, mantendo outros parâmetros de usinagem constantes. A velocidade de corte é diretamente relacionada à progressão do desgaste da ferramenta, e alterações neste parâmetro resultam em uma variedade de mecanismos de desgastes progressivos (ASTAKHOV, 2008).

Embora várias teorias tenham sido introduzidas até agora para tentar explicar os mecanismos de desgaste e a vida útil de ferramentas, como a equação de Taylor, a complexidade dos processos na zona de corte dificulta a formulação de uma teoria sólida para o desgaste de ferramentas. A natureza do desgaste de ferramentas no corte de materiais metálicos, infelizmente, ainda não está clara, apesar das inúmeras investigações realizadas nos últimos 50 anos (OZEL, 2006).

O processo de usinagem é complexo, envolvendo fenômenos como deformação plástica, fratura, impacto, pontos de contato intermitentes e contínuos,

desgaste, e se caracteriza pela geração de calor e elevada temperatura de corte. Mesmo contando com avanços, em função da existência de modernas e robustas ferramentas de simulação, devido a complexidade do processo de corte, não é muitas vezes possível obter uma descrição analítica precisa do processo. Atualmente, o auge da evolução diz respeito à usinagem de materiais duros a elevadas velocidades de corte, realizada em máquinas-ferramentas com os recursos de comando numérico (ALMEIDA, 2010).

O fresamento duro ocorre quando a dureza do material se encontra entre 42 HRC e 65 HRC (SANDVIK COROMANT, 2008 *apud* GRZESIK, 2008). Tradicionalmente, as operações de acabamento nesse tipo de material são realizadas por meio de retificação, mas recentemente, operações utilizando ferramentas de corte com geometrias definidas têm se tornado cada vez mais capazes, além de oferecerem vantagens ao processo de retificação, visto que são operações mais rápidas, oferecem maior flexibilidade de produção, operações de desbaste e acabamento podem ser realizadas na mesma máquina-ferramenta, e múltiplas operações de fresamento são mais fáceis de serem automatizadas (GRZESIK, 2008).

Em particular, o processo de usinagem de materiais duros com altas velocidades de corte podem muitas vezes cortar custos de fabricação, diminuir o tempo de produção (*lead time*) e melhorar a qualidade geral do produto (MAGALHÃES, 2017).

Nesse contexto, o presente trabalho busca avaliar a vida útil de insertos de metal duro revestidos no fresamento duro do aço AISI O1 temperado e revenido a 57 HRC.

1.1 Objetivo

Avaliar o desgaste de flanco em insertos de Metal duro revestidos no fresamento de topo do aço AISI O1 temperado e revenido.

Objetivos Específicos

- Representar as curvas de desgaste de flanco por tempo de corte e comprimento de usinagem dentro dos critérios de fim de vida de estabelecidos de $VB_B max = 0,5mm$ e $VB_B max = 0,8mm$;

- Identificar os tipos de desgaste presentes no gume, flanco principal e superfície de saída do inserto durante o processo.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco seções. Na primeira, encontra-se a Introdução, na qual são elencadas questões que direcionam este trabalho, de forma que as seções seguintes estão divididas como segue abaixo:

- 2 Revisão Bibliográfica: São reunidas as principais referências que embasaram a construção deste trabalho, começando pelas informações relacionadas ao processo de fresamento e suas características, materiais de ferramentas de corte e revestimentos, desgaste e vida de ferramentas de corte e apresentação do material usinado.
- 3 Metodologia: São descritos os métodos aplicados, os ferramentais utilizados, os equipamentos empregados e o material usinado na realização dos ensaios, obtenção dos dados e avaliação dos resultados;
- 4 Resultados e Discussões: São apresentados os principais resultados obtidos através da metodologia empregada e interpretações desses resultados com base nos referenciais utilizados;
- 5 Conclusão: Apresenta as conclusões obtidas a partir da revisão da literatura e dos resultados advindos das análises, baseadas nos resultados e de acordo com as discussões realizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e aspectos relevantes sobre o processo de usinagem, ferramentas de corte, os tipos e os mecanismos de desgaste de ferramenta, assim como alguns dos principais estudos relacionados ao escopo deste trabalho.

2.1 Usinagem

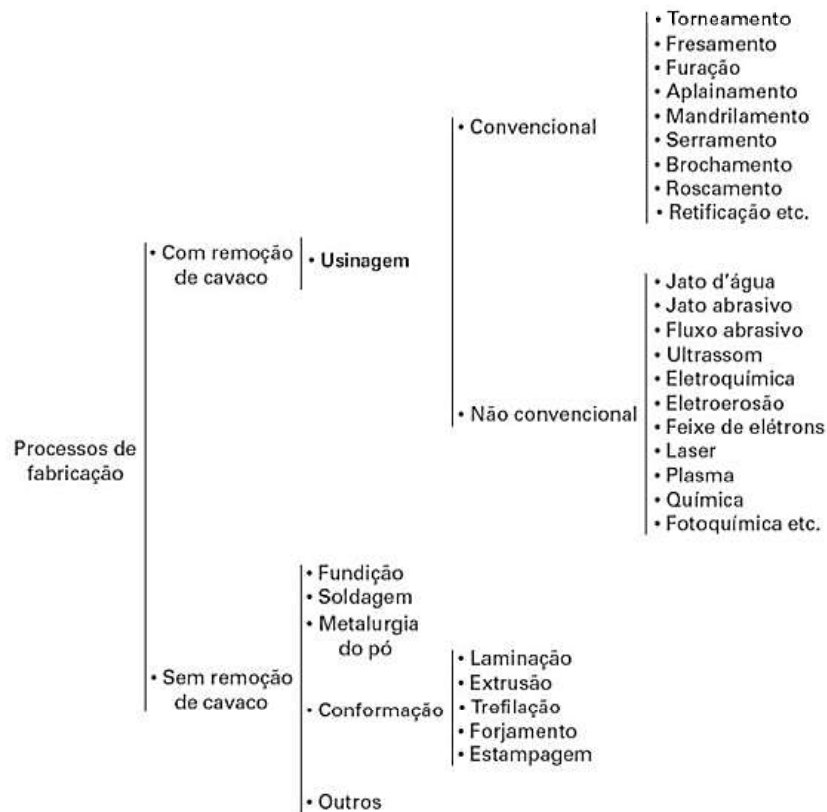
Usinagem é um termo que abrange processos de fabricação por geração de superfícies através da retirada de material, conferindo dimensão e forma a peça. Uma definição bastante ampla do termo usinagem foi apresentada por (FERRARESI, 1970), que define como “operações de usinagem são aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou qualquer combinação destes três itens, produzem cavaco”. Cavaco é definido como a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizada por apresentar forma geométrica irregular.

A usinagem é o mais versátil e preciso processo de fabricação que existe, sendo capaz de produzir uma diversidade de geometrias. É reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos uma parte considerável de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas (TRENT, 2000).

A evolução da máquina ferramenta, não apenas em termos estruturais, proporcionou melhorias no processo, como, por exemplo, a precisão de movimentos obtidos e a diminuição de vibrações mecânicas com o aumento da rigidez. Atualmente, parte considerável da evolução diz respeito à usinagem de metais com altos valores de dureza com elevadas velocidades de corte, realizadas em máquinas ferramentas com os recursos de comando numérico (ALMEIDA, 2010).

As operações de usinagem se dividem em processos de usinagem convencional e não convencional (Figura 2.1). Dentre os processos de usinagem convencional destacam-se o fresamento, furação e torneamento, no qual o fresamento será o processo utilizado neste trabalho.

Figura 2.1 - Classificação dos processos de fabricação



Fonte: MACHADO (2011).

2.1.1 Fresamento

O fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. O movimento de corte é realizado por meio de uma ferramenta chamada fresa, provida de gumes cortantes dispostos simetricamente em torno de um eixo, enquanto o movimento de avanço é feito, geralmente, em uma trajetória pré-determinada pela peça submetida ao processo de usinagem a qual está fixada na mesa da máquina, do qual lhe dá forma e dimensão desejadas (DINIZ, 2013).

É um processo utilizado na fabricação de diversos componentes, visando atender à crescente demanda dos mais variados setores da indústria. Para tanto, precisa produzir peças cada vez mais complexas, com tolerâncias dimensionais cada vez mais precisas e tolerância geométrica bem definida, bom acabamento superficial, baixo custo e, além disso, atentar para as questões ambientais.

O fresamento é um processo extremamente complexo e tem diversas variáveis envolvidas, que afetam diretamente o seu resultado. Como exemplo, a geometria e o

tipo da ferramenta, o material e estrutura da peça, a rigidez da máquina, os parâmetros de corte e os tipos de fresamento. A relação entre todas essas variáveis nem sempre fica bastante clara, mas precisa ser analisada a fim de determinar as melhores condições de corte que, por sua vez, trarão os melhores resultados (WU, 2007).

Tipos fundamentais de Fresamento

Pode-se classificar o fresamento segundo dois critérios básicos. De acordo com a posição do eixo árvore da máquina-ferramenta ou a disposição dos dentes ativos da fresa (DINIZ, 2013).

Segundo (FERRARESI, 1970), há dois tipos básicos de fresamento:

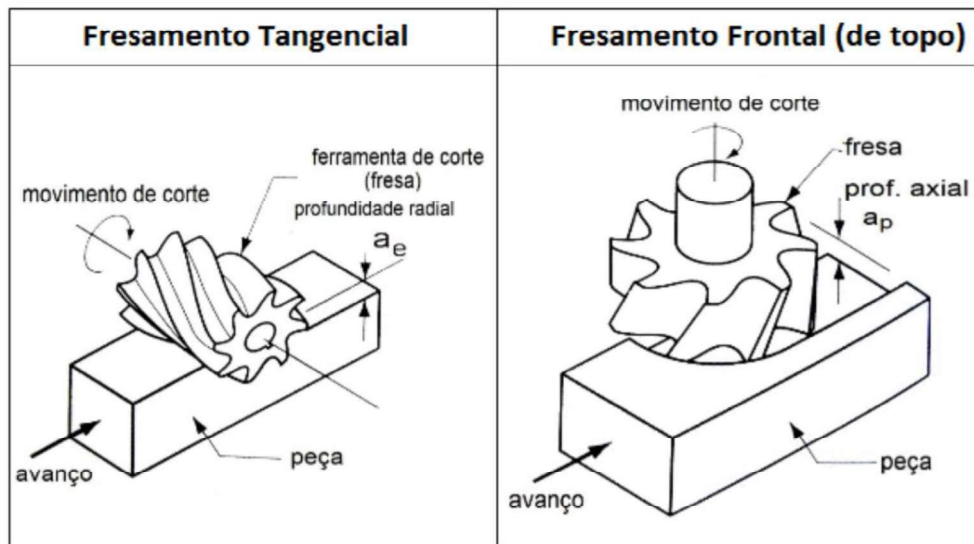
- Fresamento cilíndrico tangencial: tem como produto uma superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta, ou, em casos especiais desse mesmo processo, a superfície não é plana ou o eixo de rotação é inclinado em relação à superfície originada. Em todo caso, a superfície gerada não é perpendicular ao eixo da ferramenta. A finalidade desse tipo de fresamento é a produção de rasgos profundos e superfícies complexas.
- Fresamento frontal: ocorre quando a superfície gerada na usinagem é perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. O fresamento frontal é utilizado para produção de superfícies planas. O plano de trabalho horizontal contém as direções de corte e o avanço paralelos à superfície a ser usinada.

Os modos de fresamento são exemplificados na figura 2.2. São apontadas certas vantagens do fresamento frontal em relação ao tangencial, como melhor relação de remoção de material por potência consumida, maior rigidez da fresa, força de corte com uma melhor distribuição, maior eficiência de corte e menor tempo de ciclo de corte.

Por fim, o fresamento de topo caracteriza-se pela combinação entre o fresamento frontal e o tangencial. O corte ocorre nos dois planos de trabalho, paralelo e perpendicular, em relação ao eixo de rotação da fresa. A relação entre o diâmetro da fresa e o seu comprimento é pequena nesse fresamento, o que afeta a rigidez do sistema de fixação. Isso pode acarretar danos à máquina ferramenta e à peça usinada,

exigindo controle dos parâmetros de corte tais como avanço, velocidade e profundidade de corte.

Figura 2.2 - Fresamento Tangencial e Fresamento Frontal



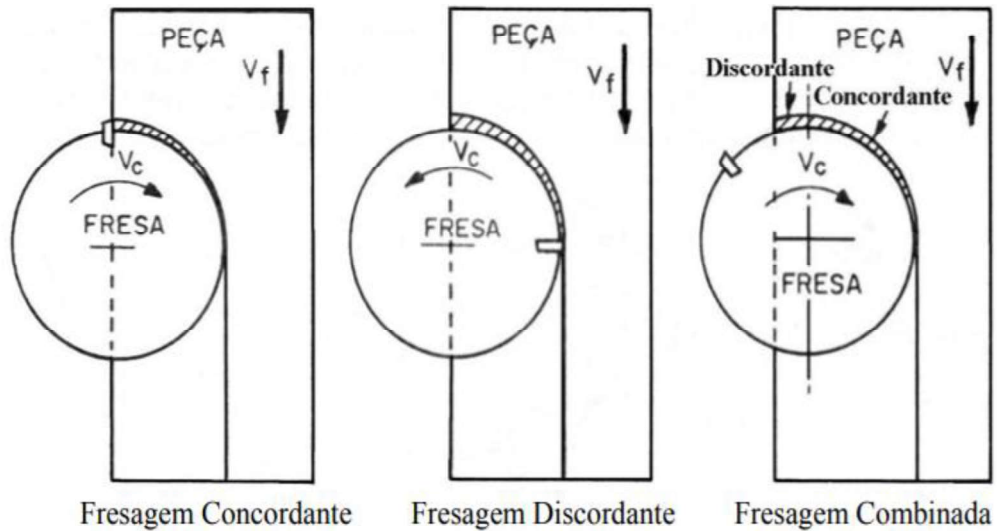
Fonte: Adaptado de (PEIXOTO, 2019 *apud* TEIXEIRA, 2017)

Direção Concordante e Discordante de corte

No fresamento concordante a ferramenta de corte avança no sentido da direção da rotação, como mostrado na Figura 2.3. A espessura dos cavacos diminuirá a partir do início do corte, se aproximando de zero gradualmente ao final do corte. Isso evita o esfregamento e a queima do gume contra a superfície antes do início do corte. Dessa maneira, de forma geral o fresamento concordante é o método mais indicado quando há não restrições quanto à geometria final da peça e sempre que a máquina-ferramenta permite.

No fresamento discordante a direção de avanço da ferramenta de corte é oposta à sua rotação. A espessura de cavaco começa em zero e aumenta até o final do corte. O gume de corte precisa ser forçado para dentro do corte, criando um efeito de esfregamento ou de queima devido ao atrito, altas temperaturas e, geralmente, contato com a superfície endurecida pelo trabalho causado pelo gume anterior. (STEMMER, 1993)

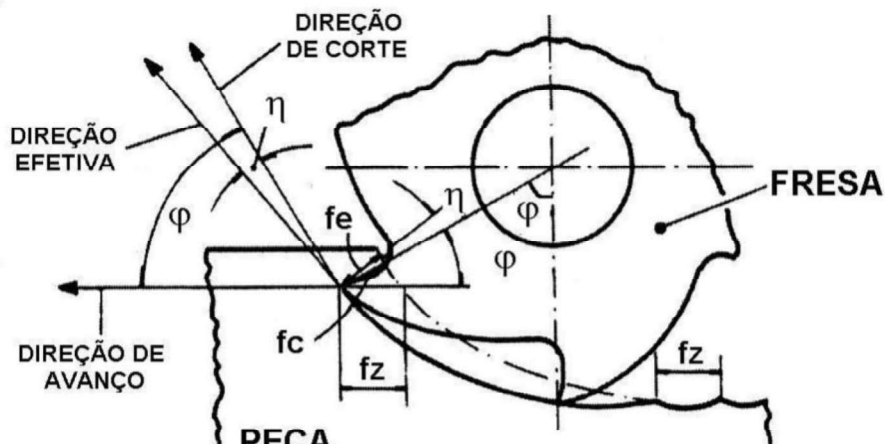
Figura 2.3 - Fresamento Discordante e Concordante



Fonte: STEMMER (1993)

2.1.2 Características e parâmetros do processo

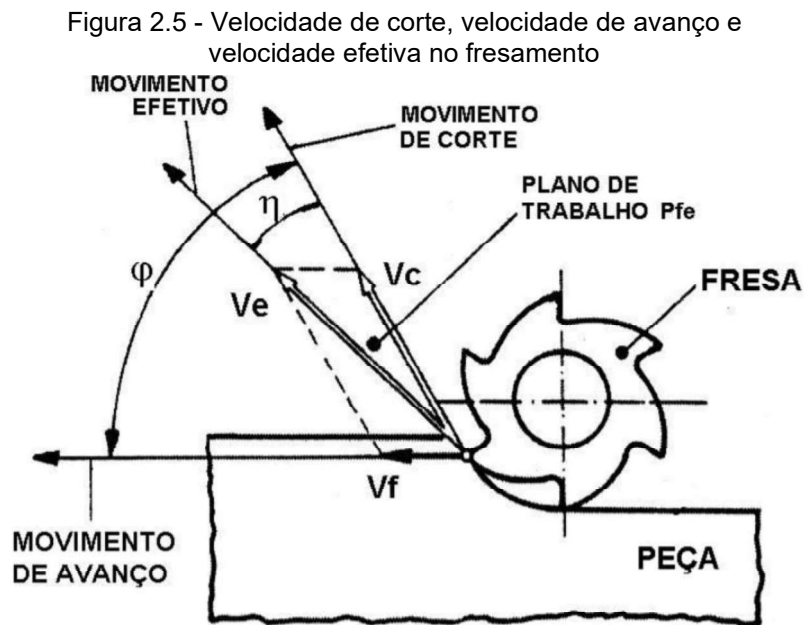
Como em todo processo de fabricação, a utilização dos parâmetros adequados é imprescindível para a obtenção da peça desejada com a melhor qualidade possível. Segundo (FERRARESI, 1970), os parâmetros mais influentes no processo de fresamento são definidos e esquematizados a seguir. Na Figura 2.4, são apresentados alguns dos parâmetros cinemáticos em forma vetorial do processo de usinagem em uma representação geométrica, dos tipos de avanço para um modo de fresamento discordante:

Figura 2.4 - Avanço por dente (f_z) e Avanço efetivo (f_e)

Fonte: NBR 6162 (1989)

- Avanço (f): é o percurso de avanço em cada curso da ferramenta.
- Avanço por dente (f_z): é o percurso de avanço de cada dente, medido na direção do avanço da ferramenta.
- Avanço de corte efetivo (f_e): é a distância entre duas superfícies de corte consecutivas formadas, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção efetiva de corte

Na Figura 2.5, são apresentados os vetores referentes à velocidade de corte, à velocidade de avanço e à velocidade efetiva no fresamento:



- Velocidade de corte (v_c): é a velocidade instantânea do ponto de referência do gume cortante, segundo a direção e sentido de corte.
- Velocidade de avanço (v_f): é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço.
- Velocidade efetiva de corte (v_e): é a velocidade instantânea do ponto de referência do gume cortante, segundo a direção efetiva de corte.

A velocidade de corte é calculada segundo a Eq. (1)

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m/min] \quad (1)$$

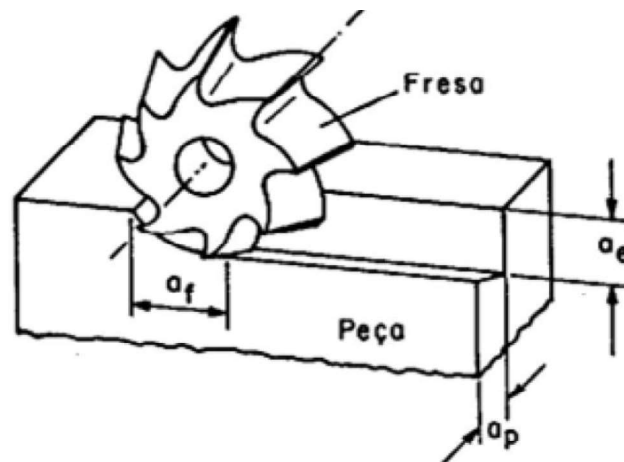
Onde, D representa o diâmetro da fresa em mm e n a rotação da fresa em rpm. Já a velocidade de avanço é formulada pela Eq. (2).

$$v_f = n \cdot Z \cdot f_z \text{ [mm/min]} \quad (2)$$

Onde, Z representa o número de dentes da fresa e f_z o avanço por dente em mm . Na Figura 2.6, são apresentados os parâmetros de profundidade de corte e espessura de penetração:

- Profundidade de corte (a_p): é a profundidade de penetração do gume principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho.
- Espessura de penetração (a_e): é a espessura de corte em cada curso, medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço.

Figura 2.6 - Profundidade de corte (a_p) e Espessura de penetração (a_e)



Fonte: NBR 6162 (1989)

2.2 Ferramentas de corte

Aqui serão apresentadas definições básicas e visualizações dos principais componentes da geometria das ferramentas de corte, de grande importância no processo de usinagem. Os tipos e propriedades dos materiais de ferramentas modernos também são considerados, uma vez que essas propriedades definem as limitações na geometria da ferramenta. Os mecanismos básicos de desgaste da ferramenta são demonstrados. Critérios e medidas de vida da ferramenta também são apresentados em termos de avaliações modernas da vida útil.

2.2.1 Geometria da ferramenta

Durante as recentes décadas, a indústria metalomecânica passou por várias mudanças importantes que trouxeram a geometria dos ferramentais a vanguarda dos processos de usinagem. Os atuais equipamentos que dão forma aos ferramentais modernos são normalmente máquinas-ferramenta CNC, geralmente com quatro, cinco ou seis eixos, capazes de gerar geometrias muito complexas, e materiais extremamente duros e exóticos geralmente não são problema para os sistemas de retificação de hoje (ASTAKHOV, 2008).

A geometria da ferramenta é de grande importância visto que:

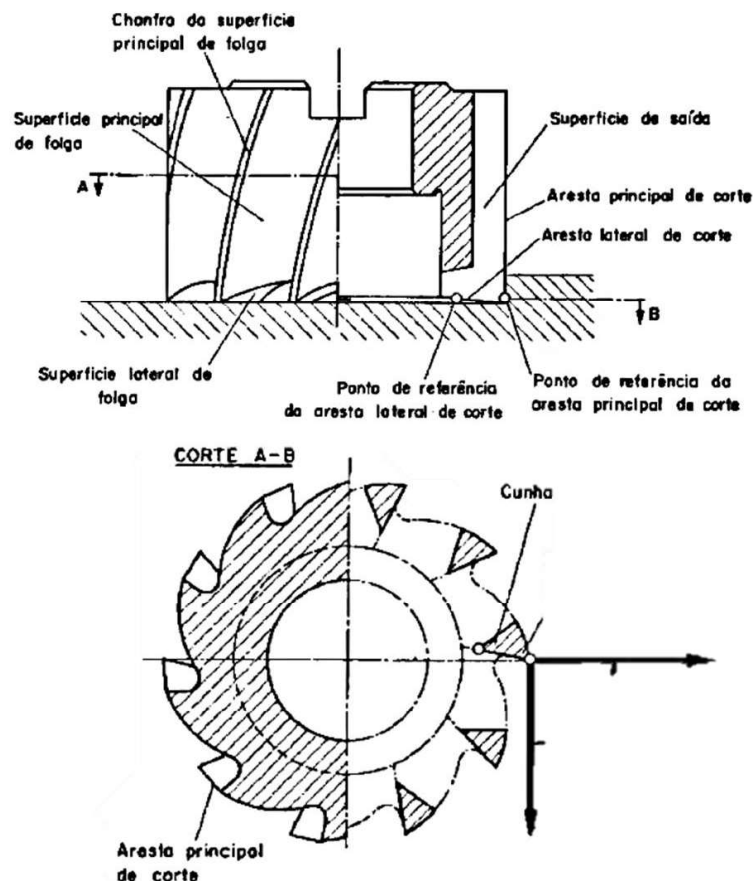
- Controle de cavaco: A geometria da ferramenta define a direção do escoamento de cavaco, importante para controlar a evacuação e a quebra.
- Produtividade: O avanço é considerado o principal recurso para aumentar a produtividade, este pode ser significativamente aumentado ajustando a angulação do gume de corte da ferramenta.
- Vida útil da ferramenta. A geometria da ferramenta de corte afeta diretamente a vida útil, pois esta geometria define a magnitude e direção da força de corte e suas componentes, a velocidade de deslizamento na interface ferramenta-cavaco, a distribuição da energia térmica liberada na usinagem, a distribuição de temperatura na cunha de corte etc.
- Qualidade (integridade superficial e tensão residual de usinagem) de usinagem: A influência da geometria da ferramenta na tensão residual de usinagem é facilmente percebida visto que esta geometria define o estado de tensão na zona de deformação.

Existem duas normas básicas para definição da geometria de ferramentas: (a) the American National Standard B94.50–1975 “Basic Nomenclature and Definitions for Single-Point Cutting Tools 1”, data reafirmada de 2003, (b) ISO 3002/1 “Basic quantities in cutting and grinding – Part 1: Geometry of the active part of cutting tools – General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers”, segunda edição 08-01-1982. Apesar de ambos os padrões estarem desatualizados e, portanto, não levarem em conta as mudanças significativas nas indústrias de usinagem de

metal e os avanços da teoria e prática de corte de metal, eles podem ser usados para representar a geometria básica da ferramenta de corte (ASTAKHOV, 2008).

As ferramentas possuem a seguinte estrutura (Figura 2.7):

Figura 2.7 - Geometria das ferramentas de corte



Fonte: STEMMER (1993)

- Cunha é a porção da parte ativa da ferramenta incluída entre a face e o flanco;
- Face ou Superfície de saída (A_y) é a superfície sobre a qual o cavaco escoia;
- Flanco ou Superfície de folga (A_a) é a superfície da cunha voltada para a correspondente superfície usinada da peça;
- Superfície secundária de folga (A_a') é a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem secundária;
- Gume ou aresta de corte é a aresta formada pela face e o flanco, destinada a efetuar o corte;
- Gume principal de corte (s) é definida pela interseção da superfície de saída e de folga principal;

- Gume secundário de corte (s') é definida pela interseção da superfície de saída e superfície secundária de folga (FERRARESI, 1970).

2.2.2 Materiais de ferramenta de corte

Existe uma ampla gama de materiais que podem ser usados na fabricação de ferramentas de corte, devido aos intensos investimentos que são feitos em pesquisas e desenvolvimento de novas ferramentas com novos materiais. A introdução de ferramentas de corte mais sofisticadas tem contribuído para a melhoria dos processos de usinagem com a redução dos tempos de corte e o crescimento do volume de cavaco removido (MARCONDES, 1990).

Dentre essa gama de materiais de ferramenta que existem, pode-se citar os mais conhecidos e utilizados na indústria, sendo eles: Aços ferramentas e aços rápidos, Metal duro, Cerâmicas e Cermet, PCBN e Diamante.

Aços ferramentas e aços rápidos

- Aços ferramenta: são aços carbono com teores de 0,8% a 1,5% de carbono. Não possuem outros elementos de liga, a não ser em mínimas porcentagens (STEMMER, 1993).
- Aços rápidos comuns: este tipo de material mantém sua dureza até temperaturas em torno de 600°C, possuindo maior resistência à abrasão associada à resistência a quente, o que permite a utilização de velocidades de corte maiores que os aços ferramenta. Apesar das vantagens, o aço rápido possui um preço elevado e difícil tratamento térmico (STEMMER, 1993)

Metal duro

Material da metalurgia do pó. É um composto de partículas de carboneto de tungstênio (WC) e um ligante rico em cobalto metálico (Co). Os metais duros para aplicações de usinagem representam mais de 80% do (WC) fase dura. (SANDVIK COROMANT, 2021)

De acordo com (AMORIM, 2003), a norma ISO 513/1975 classifica os metais duros em três grupos, designados pelas letras P, M, e K, também designados por um código de cores (azul, amarelo e vermelho). A classificação dentro de um grupo ou de outro é feita de acordo com a aplicação do metal duro, uma vez que a variedade de composições químicas e processos de fabricação torna difícil a padronização em outras características. Dentro de cada grupo, ainda há uma classificação usando números. O agrupamento que, de acordo com (FERRARESI, 1970) e (AMORIM, 2003), conforme citado acima, a ISO 513/1975 propõe para a classificação dos metais duros está disposto abaixo:

- Grupo P – compreendendo os tipos ou as classes empregados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos longos e dúcteis (cavaco contínuo);
- Grupo M – compreendendo as classes que se empregam na usinagem de metais e ligas ferrosas de cavacos tanto longos como curtos;
- Grupo K – compreendendo as classes que se destinam à usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos (cavaco de ruptura) e materiais não metálicos (FERRARESI, 1970).

De forma especial, deve-se ressaltar o grupo P, que segundo (STEMMER, 1993), de acordo com a norma ISO 513/1975 é utilizado para usinagem de aço, aço fundido e de ferro fundido maleável, nodular ou ligado. Além de WC, tem percentagens mais ou menos elevadas de TiC (até 35%) e TaC (até 7%).

Cerâmica

As ferramentas deste tipo têm como componente principal o coríndon (Al_2O_3), o qual é uma forma estável α da alumina, e está presente na ferramenta cerâmica na forma de um pó muito fino. A qualidade deste tipo de ferramenta depende da baixa porosidade associada a pequenos tamanhos de grãos. Possuindo as seguintes qualidades e/ou vantagens das quais serão listadas a seguir:

- Alta dureza a quente (se mantém até cerca de 1600 °C);
- Elevada estabilidade química do óxido de alumínio;
- Não há risco de desgaste eletroquímico, pois a cerâmica é isolante;
- Alta resistência à compressão;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Nenhuma afinidade com o aço (não formando gume postiço).

Os dois últimos pontos mostram que as ferramentas de cerâmica asseguram um excelente acabamento da superfície e resultam em um menor desgaste, garantindo uma melhor precisão dimensional das peças. Dentre as desvantagens podemos destacar:

- Grande fragilidade, se tornando deficiente na usinagem interrompida, no emprego em máquinas pouco rígidas e a vibrações;
- Condutibilidade térmica muito baixa, tornando-se sensível a variações bruscas de temperatura (FERRARESI, 1970).

2.2.3 Revestimentos de ferramentas de corte

O uso de revestimentos, além de propiciar maior dureza superficial na ferramenta, em geral minimiza o atrito na interface cavaco-ferramenta, tendo como consequência, menor deformação plástica e encruamento do material da peça, o que melhora sua integridade superficial (HONG, 2005). A crescente demanda em várias situações tribológicas (principalmente atrito e desgaste) tem estimulado o desenvolvimento de uma variedade revestimentos (MORANT, 2004).

Diante de um grande número de aplicações de usinagem, se faz necessária a existência de coberturas para atribuição de características específicas à ferramenta de corte.

Coberturas PVD

As coberturas PVD (*Physical Vapor Deposition*) deposição física de vapor são formadas em temperaturas relativamente baixas, cerca de 400 a 600°C. O processo envolve a evaporação de um metal que reage, por exemplo, com nitrogênio para formar uma cobertura de nitreto dura na superfície da ferramenta de corte (SANDVIK COROMANT, 2021).

O processo de revestimento PVD é realizado em baixas temperaturas, o que permite substancial eliminação da descarbonetação do substrato de metal duro e a manutenção da tenacidade e resistência. Apesar disto, a vida das ferramentas revestidas pelo processo convencional de PVD é muito menor que as ferramentas revestidas por CVD, em função de uma adesão relativamente fraca e do elevado nível de tensão interna dos revestimentos de PVD (KONYASHIN, 1995).

As coberturas PVD agregam resistência ao desgaste a uma classe devido à sua dureza. Tensões de compressão das coberturas também agregam tenacidade ao gume e resistência contra trincas térmicas. Os principais constituintes da cobertura PVD são:

- TiN: a primeira cobertura PVD era nitreto de titânio. Ela possui propriedades de uso geral e uma cor dourada;
- Ti(C, N): o carbonitreto de titânio é mais duro do que o TiN e agrega resistência ao desgaste de flanco;
- (Ti, Al)N: o nitreto de titânio - alumínio possui maior dureza em combinação com resistência à oxidação, melhorando a resistência;
- Óxido PVD: usado por sua inerência química e resistência aprimorada à craterização. (FALLQVIST, 2007).

As classes com cobertura PVD são recomendadas para gumes de corte tenazes e afiados, bem como para materiais com tendência a abrasão. Muitas dessas

aplicações envolvem a maioria das brocas e fresas inteiriças e a maioria das classes para usinagem de canais, rosqueamento e fresamento.

Coberturas CVD

A cobertura CVD (*Chemical Vapor Deposition*) deposição química de vapor é gerada por reações químicas em temperaturas de 700 a 1050°C. Possuem alta resistência ao desgaste e excelente adesão ao metal duro.

O primeiro metal duro com cobertura CVD era de uma única camada de carboneto de titânio (TiC). As coberturas de óxido de alumínio (Al_2O_3) e de nitreto de titânio (TiN) foram introduzidas posteriormente. Mais recentemente, as coberturas de carbonitreto de titânio (MT – Ti(C, N) ou MT – TiCN), também chamada de MT – CVD, foram desenvolvidas para melhorar as propriedades da classe devido à sua habilidade em manter intacta a interface de metal duro (SANDVIK COROMANT, 2021).

Ti(C, N): No geral, os cermets com este tipo de revestimento são compostos por duas fases. Uma é a fase cerâmica (Ti(C, N) ou uma mistura de TiC e TiN) a qual provém alta dureza, e a outra fase de liga metálica (Ni ou Co ou uma mistura dos dois) que une a fase cerâmica e contribui para a resistência, ductilidade, e resistência a choques térmicos. Também apresenta melhor resistência à abrasão e propriedade antiadesiva quando comparado ao TiN, resultando na redução do desgaste de flanco (ZHOU, 2014);

- Al_2O_3 : Quimicamente inerte com baixa condutividade térmica, tornando-o resistente a craterizações. Atua também como uma barreira térmica para melhorar a resistência à deformação plástica. Entretanto, em função do deslizamento do material da peça contra a superfície de saída e de folga da ferramenta, as faces da alumina são expostas ao desgaste adesivo e abrasivo simultaneamente, o que limita o tempo de vida em muitas aplicações de usinagem (FALLQVIST, 2007);
- TiN: Tem como uma das características principais a resistência de adesão entre a camada de revestimento e o substrato, que é necessária para suportar vários tipos de carga, tais como cíclicas, mecânicas, térmicas, etc. (KIM, 2003).

Estes revestimentos apresentam uma melhora na resistência ao desgaste e é usada para detecção de desgaste. Tratamentos posteriores: melhoram a tenacidade do gume em cortes interrompidos e reduz as tendências à abrasão. As coberturas modernas de CVD combinam $MT - Ti(C,N)$, Al_2O_3 e TiN. As propriedades da cobertura foram melhoradas continuamente quanto às propriedades de adesão, tenacidade e desgaste em virtude de otimizações e tratamentos posteriores microestruturais (SANDVIK COROMANT, 2021).

Os revestimentos depositados por CVD são basicamente aplicados a ferramentas de corte em função dos requisitos de adesão. Entretanto as elevadas temperaturas de deposição dessa técnica limitam a seleção de materiais do substrato. A temperatura de processo pode atingir cerca de $1000^{\circ}C$ causando amaciamento do substrato e deformações (CHENG, 2010). Cermets com cobertura de TiC e Ti(CN) demonstram excelente dureza, estabilidade térmica a altas temperaturas, resistência a deformação, desgaste e corrosão (KANG, 2009).

No geral, as classes com cobertura CVD são indicadas para aplicações onde a resistência ao desgaste é um fator importante. Tais aplicações podem ser encontradas em torneamento geral e mandrilhamento de aços (MARTINS, 2019).

2.3 Desgaste de ferramenta

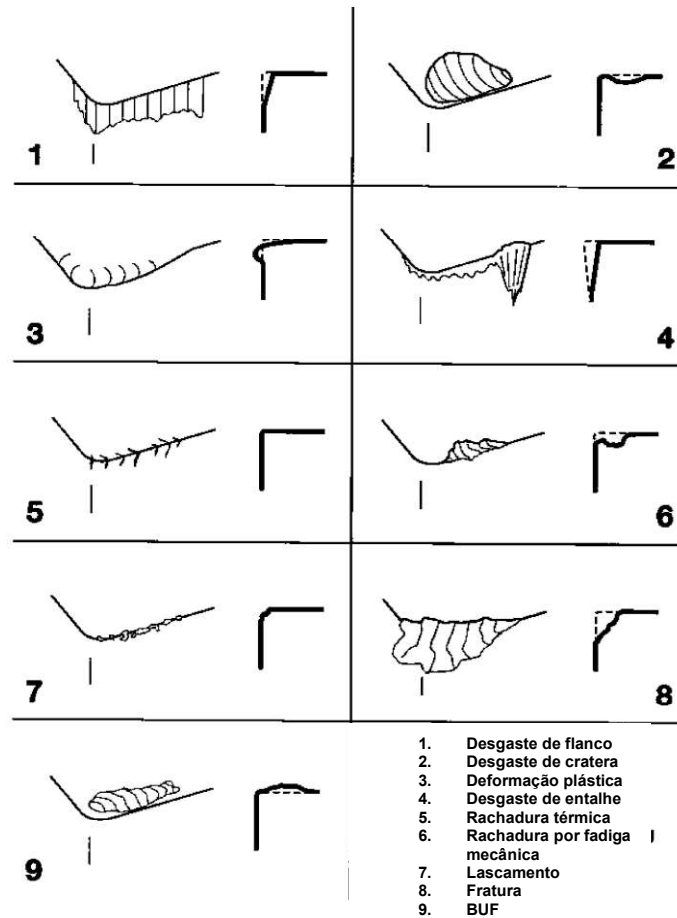
O desgaste da ferramenta leva à falha da ferramenta. Devido ao caráter progressivo do desgaste de ferramentas de corte, é necessário, para evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos excessivos por inadequação da máquina-ferramenta, que se defina até onde uma ferramenta de corte pode ser útil, atendendo os requisitos operacionais e de qualidade. Quando começa a perder suas características operacionais indica que a ferramenta deve ser substituída ou reafiada, se for aplicável (ASTAKHOV, 2008).

Geralmente, o desgaste das ferramentas de corte depende do material e da geometria da ferramenta, do material da peça a ser usinada, dos parâmetros de corte (velocidade de corte, taxa de alimentação e profundidade de corte), fluidos de corte e características de máquina-ferramenta (ASTAKHOV, 2008). A Figura 2.8 mostra alguns tipos de falhas e desgastes nas ferramentas de corte.

Normalmente, o desgaste de ferramenta é um processo gradual. Existem duas zonas básicas de desgaste nas ferramentas de corte: desgaste de flanco e desgaste

de cratera. Desgaste de flanco e cratera são as formas mais importantes de medição do desgaste da ferramenta. O desgaste de flanco é mais comumente utilizado para monitoramento de desgaste. De acordo com o padrão ISO 8688:1989 para medições de desgaste, o principal gume de corte é considerado dividido em quatro regiões, conforme mostrado na Figura 2.9:

Figura 2.8 - Tipos de desgaste em ferramentas de corte

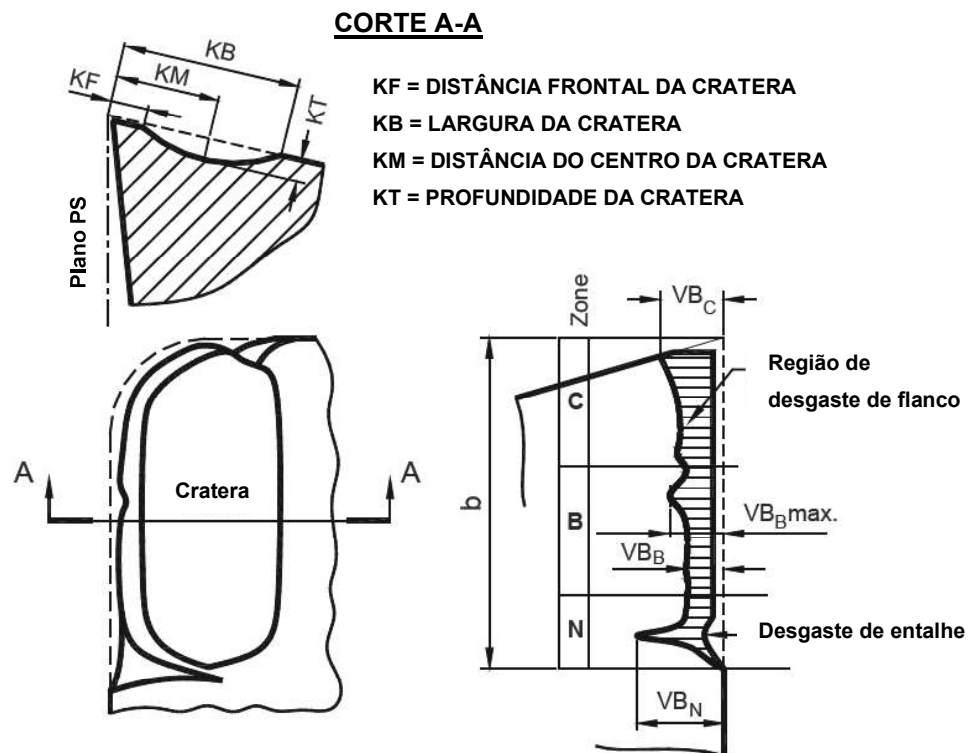


Fonte: Adaptado de (ASTAKHOV, 2008 *apud* SANDVIK COROMANT, 2008).

- A região C é a parte curva do gume de corte no canto da ferramenta;
- Região B é a região reta restante do gume de corte na zona C;
- Região A é o quarto do comprimento do gume de corte desgastado de comprimento b mais distante do canto da ferramenta;
- Região N se estende além da área de contato mútuo entre a ferramenta peça por aproximadamente $1 - 2\text{mm}$ ao longo do gume de corte principal. O desgaste é do tipo entalhe.

A largura da região de desgaste de flanco, VB_B , é medida dentro da zona B, no plano P_s (Figura 2.9) perpendicular ao gume de corte principal. A largura da zona de desgaste de flanco é mensurada a partir da posição original do gume de corte principal. A profundidade de cratera é mensurada como a distância máxima entre o fundo da cratera e a face original na região B (ASTAKHOV, 2008).

Figura 2.9 - Tipos de desgaste de ferramenta



Fonte: ISO 8688 (1989)

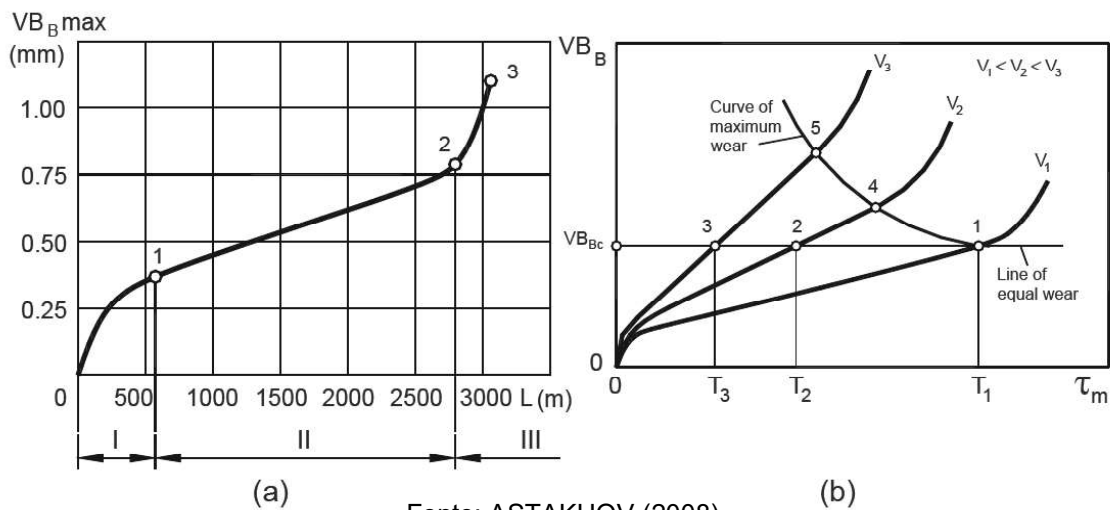
2.3.1 Evolução de desgaste de ferramenta

As curvas de desgaste da ferramenta ilustram a relação entre a quantidade de desgaste de flanco e o tempo de corte, τ_m , ou o comprimento total de corte, L . Figura 2.10a mostra a evolução do desgaste de flanco VB_Bmax , conforme medido após um certo comprimento de corte. Normalmente, existem três regiões distintas que podem ser observadas em tais curvas. A primeira região (região I na Figura 2.10a) é a região de desgaste primário ou inicial. A taxa de desgaste relativamente alta (um aumento de desgaste da ferramenta por unidade de tempo ou comprimento de corte) nesta região é explicada por desgaste acelerado das camadas da ferramenta danificadas durante a fabricação ou afiação. A segunda região (região II na Figura 2.10a) é a

região de regime estacionário. Esta é a região normal de operação da ferramenta de corte. A terceira região (região III na Figura 2.10a) é conhecida como a região de desgaste terciária ou acelerada. O desgaste acelerado da ferramenta nesta região é geralmente acompanhado por altas forças de corte, altas temperaturas e vibrações severas da ferramenta. Normalmente, a ferramenta não deve ser utilizada nesta região (ASTAKHOV, 2008).

Na prática, a velocidade de corte é a principal preocupação quando se considera desgaste de ferramenta. Como tal, as curvas de desgaste da ferramenta são construídas para diferentes velocidades de corte, mantendo outros parâmetros de usinagem constantes. Na Figura 2.10b, três curvas de desgaste da ferramenta características (valores médios) são mostradas para três velocidades de corte diferentes, v_1 , v_2 e v_3 . Como v_3 é maior que as outras duas, ela corresponde à mais rápida taxa de desgaste. Quando a quantidade de desgaste atinge o desgaste de ferramenta permitido VB_{BC} , é dito que a ferramenta atingiu sua vida útil (ASTAKHOV, 2008).

Figura 2.10 - Curvas de desgaste: (a) Curva de desgaste casual, (b) Evolução do desgaste de flanco VB_B em função do tempo de corte para diferente velocidades de corte



Fonte: ASTAKHOV (2008)

Normalmente VB_{BC} é selecionado na faixa de $0,15 - 1,00 \text{ mm}$, dependendo mediante do tipo de operação de usinagem, a condição da máquina-ferramenta e a qualidade requerida pela operação. Muitas vezes, é selecionado com base na eficiência do processo e frequentemente chamado de critério de vida útil da ferramenta.

Na Figura 2.10b, T_1 é a vida da ferramenta quando a velocidade de corte v_1 é usada, T_2 quando v_2 e T_3 quando v_3 . Quando a integridade da superfície usinada permite, a curva de desgaste máximo deve ser usada em vez da linha de desgaste igual (Figura 2.10b). Assim sendo, a diferença entre a vida útil das ferramentas entre velocidades de corte mais baixas e mais altas torna-se menos significativa. Como resultado, uma maior taxa de produtividade pode ser alcançada, o que é particularmente importante quando utilizadas máquinas CNC de alta velocidade (ASTAKHOV, 2008).

A Figura 2.11 mostra um exemplo de um típico desgaste de flanco de uma ferramenta de Diamante por CVD, observada durante a usinagem de liga de alumínio com alto teor de silício (MMR). Recomendações utilizadas na prática industrial para o limite de desgaste de flanco VB_B para diversos materiais de ferramentas de corte são apresentados na tabela 2.1

Figura 2.11 - Exemplo de desgaste de flanco para um inserto de diamante CVD na usinagem de MMC



Fonte: ASTAKHOV (2008)

Tabela 2.1 - Recomendações utilizadas na prática industrial para o limite de desgaste de flanco VB_B para vários materiais de ferramentas

Material da ferramenta		Aços Rápidos	Metais Duros	Metais Duros Revestidos	Cerâmicas	
Operação	(mm)				Al_2O_3	Si_3N_4
Desbaste	VB_B	0.35–1.0	0.3–0.5	0.3–0.5	0.25–0.3	0.25–0.5
Acabamento	VB_B	0.2–0.3	0.1–0.25	0.1–0.25	0.1–0.2	0.1–0.2

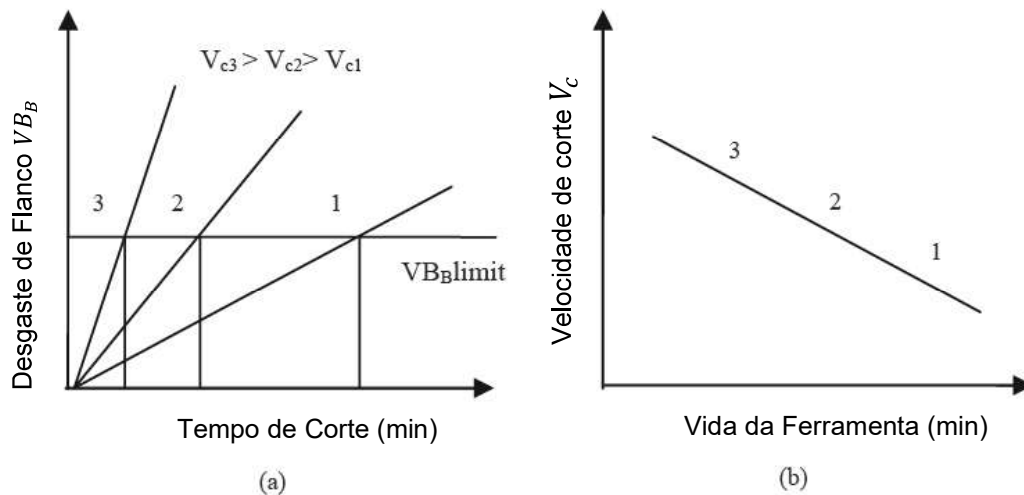
Fonte: ASTAKHOV (2008)

2.4 Fórmula de Vida da Ferramenta de Taylor

O desgaste da ferramenta é quase sempre usado como um critério de vida útil porque é fácil de determinar quantitativamente. O desgaste de flanco VB_B é frequentemente usado como critério por causa de sua influência na rugosidade e precisão da superfície da peça de trabalho (ASTAKHOV, 2008).

A Figura 2.12 mostra as curvas de desgaste (VB_B x tempo de corte) para várias velocidades de corte (1, 2 e 3) e a construção da curva de vida (velocidade de corte x vida útil da ferramenta).

Figura 2.12 - Curvas de desgaste para várias velocidades de corte (V_1, V_2 e V_3) (a) e curva de vida (b)



Fonte: ASTAKHOV (2008)

(TAYLOR, 1907) apresentou a seguinte equação (3):

$$V_c T^n = C \quad (3)$$

Onde V_c é a velocidade de corte m/min , T é a vida útil da ferramenta em min necessária para desenvolver um certo desgaste de flanco VB_B , n é um expoente que depende dos parâmetros de corte e C é uma constante. Observe que C é igual à velocidade de corte em $T = 1 \text{ min}$.

Portanto, cada combinação de material de ferramenta e peça de trabalho e cada parâmetro de corte tem seus próprios valores n e C , a serem determinados experimentalmente. Por exemplo, escolhendo dois pontos extremos (Figura 2.12(a)),

pontos 1 e 3, $V_c = 200\text{m/min}$, $T = 40\text{ min}$ e $V_c = 400\text{m/min}$, $T = 10\text{ min}$, respectivamente, temos:

$$200 \times 40^n = C \quad (4)$$

$$400 \times 10^n = C \quad (5)$$

Através dos logaritmos naturais de cada termo, temos:

$$\ln 200 + n \ln 40 = \ln 400 + n \ln 10 \quad (6)$$

$$5,298 + n \times 3,689 = 5,991 + n \times 2,303 \quad (7)$$

$$n = 0,5 \quad (8)$$

Substituindo este valor de n nas Equações (4) e (5), pode-se calcular os valores correspondentes de C .

$$C = 200 \times 40^{0,5} = 804 \text{ ou } C = 400 \times 10^{0,5} = 1264,9 \quad (9)$$

A equação de Taylor para os dados mostrados na Figura 2.12 é:

$$V_c T^{0,5} = 1264,9 \quad (10)$$

A Tabela 2.2 apresenta a faixa de valores n determinados na prática para alguns materiais de ferramenta.

Tabela 2.2 - Valores de n observados na prática para vários materiais de ferramentas de corte

Material da ferramenta	Aços rápidos	Metais Duros	Cerâmicas
n	0.1–0.2	0.2–0.5	0.5–0.7

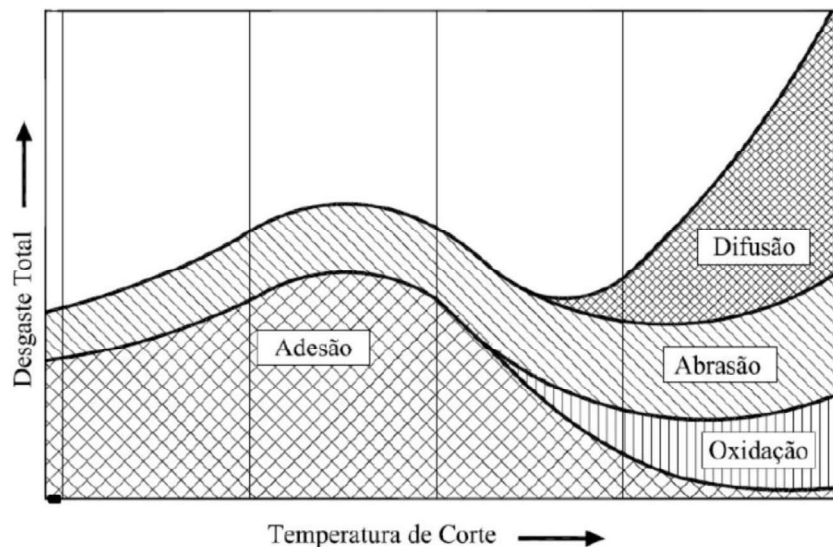
Fonte: ASTAKHOV (2008)

2.5 Mecanismos de desgaste de ferramenta

É considerado como mecanismo de desgaste todo fenômeno distinto capaz de provocar ou causar um desgaste de uma ferramenta de corte. A difusão, abrasão, oxidação e adesão são mecanismos que promovem desgastes através de deformação plástica por cisalhamento, ocorridos na usinagem de metais. Os diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa como seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si, resultando em uma complexa interação de vários fatores de desgaste (CARVALHO, 2019).

A Figura 2.13 apresenta um diagrama clássico, onde a importância dos quatro principais mecanismos de desgastes é ilustrada em função da temperatura de corte. Em baixas temperaturas, predomina o mecanismo de adesão atuando em conjunto com a abrasão. Em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar para os mecanismos de difusão e oxidação (KLAUBERG, 2009).

Figura 2.13 - Mecanismos de desgastes presentes nas ferramentas de corte em função da temperatura de corte



Fonte: CARVALHO (2019).

2.5.1 Difusão

O processo de difusão é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão do estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro. Depende da temperatura, da duração do contato e da afinidade

físico-química dos dois metais envolvidos. Este mecanismo de desgaste pode atuar tanto na superfície de saída como na superfície de folga, com a taxa de desgaste aumentando com o aumento da velocidade de corte e do avanço.

As temperaturas associadas ao desgaste difusivo situam-se em torno de 850°C a 1200°C, desde que não promova a fusão do material. A difusão é responsável, sobretudo pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte (TRENT, 2000).

A Figura 2.14 exemplifica o mecanismo de difusão.

Figura 2.14 - Mecanismo de difusão ocorrido na superfície de saída da ferramenta



Fonte: ISCAR (2001)

2.5.2 Abrasão

O Mecanismo de desgaste abrasivo é dado como uma das principais causas de desgaste da ferramenta, tanto frontal quanto o desgaste de cratera. Em ferramentas de metal duro, que possui quantidades muito grandes de carboneto de tungstênio (WC) em sua composição, o desgaste abrasivo é pouco eficiente no que diz respeito à degradação da ferramenta (MACHADO, 1999).

Figura 2.15 - Mecanismo de abrasão na ferramenta de corte



Fonte: ISCAR (2001)

A Figura 2.15 mostra um exemplo de um ferramental com desgaste abrasivo.

Tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, no entanto, cabe destacar que ela se faz mais proeminente no desgaste de flanco, já que a superfície de folga entra em atrito com um elemento rígido (peça), enquanto a face entra em atrito com um elemento flexível (cavaco). O desgaste gerado pela abrasão é intensificado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta. Com isso, partículas da ferramenta são arrancadas à alta pressão e temperatura, em razão do atrito entre ferramenta/peça. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste por abrasão. (TRENT, 2000) relata que o desgaste por abrasão é possível responsável por atrito durante o corte por cisalhamento de material, ocasionando vibração, que posteriormente origina a falha catastrófica de ferramentas.

2.5.3 Adesão

Quando se trabalha durante a usinagem em velocidades relativamente baixas, onde duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas e baixas temperaturas, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato (ALMEIDA, 2010). A Figura 2.16 apresenta um exemplo de uma ferramenta com APC.

Figura 2.16 - Ferramenta com APC na aresta de corte



Fonte: SANDVIK COROMANT (2021)

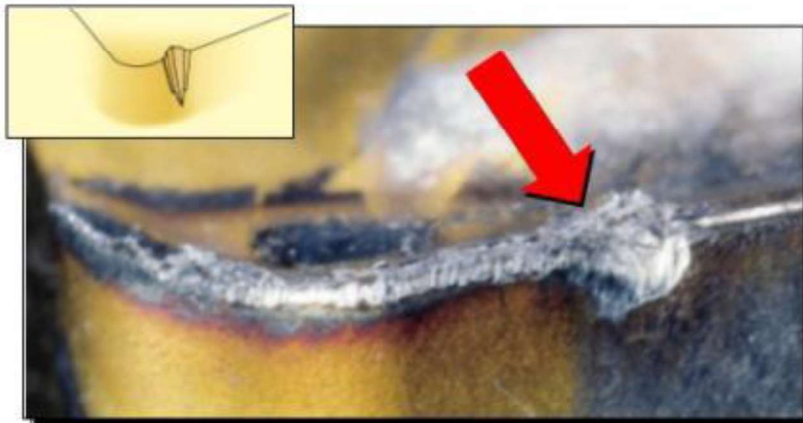
Assim, partículas da superfície de um metal migram para a superfície de outro. O fenômeno da aderência está presente na formação da aresta postiça de corte (APC) e o contato com a ferramenta torna-se menos contínuo.

A utilização adequada do fluido de corte principalmente com efeito lubrificante e o recobrimento da ferramenta de corte com materiais de baixo coeficiente de atrito, como nitreto de titânio, faz com que haja uma grande influência na diminuição desse tipo de desgaste (DINIZ, 2013). O fenômeno da aderência está presente na formação de gume postiço de corte, mas pode-se ter desgaste por aderência mesmo sem a formação deste. Tal fenômeno também é importante na formação do desgaste de entalhe. (MARQUES, 2012).

2.5.4 Oxidação

A exposição a alta temperatura e a presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) gera oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe (ALMEIDA, 2010). Um exemplo é mostrado na Figura 2.17

Figura 2.17 - Desgaste por oxidação do gume de corte da ferramenta



Fonte: ISCAR (2001)

Os desgastes nas ferramentas de corte causam paradas indesejadas de máquinas na indústria, e no mínimo se faz necessário a troca de ferramenta, ocasionando custos. Esses desgastes podem ser minimizados através de alterações nos parâmetros de usinagem, visando um aumento na vida útil da ferramenta. Ocorre

também a deformação por altas tensões de compressão ou entalhe cujo processo ocorre na usinagem dos materiais de alta dureza (TRENT, 2000).

Solicitações mecânicas, térmicas e tribológicas decorrentes dos processos de usinagem, levam a desgastes e a sobrecargas mecânicas e térmicas dos gumes das ferramentas de corte, que podem resultar em sinais típicos de desgaste como, desgaste de cratera, de flanco, lascamentos de várias dimensões ou deformações plásticas. (CASTILLO, 2005).

2.6 Usinagem de materiais endurecidos

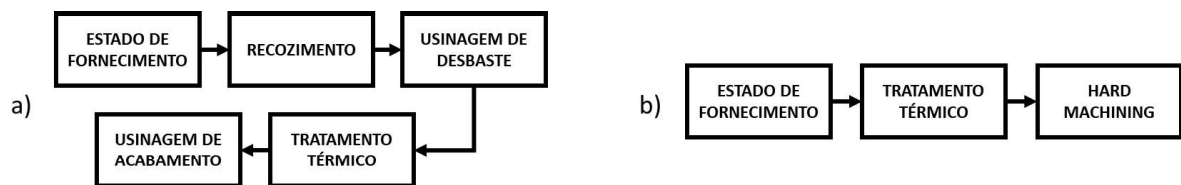
Basicamente, a usinagem de materiais endurecidos, é definida como o processo de corte de peças que têm valores de dureza acima de 45 HRC (SANDVICK COROMANT, 2021). Normalmente, os materiais “difíceis de cortar” incluem ferros fundidos, aços rápidos, aços para ferramentas e para rolamentos, aços temperados e aços cementados. Inconel, Hastelloy, Stellite e Titânio também são postos nesta categoria (GRZESIK, 2008).

Suas aplicações se espalharam por ramos industriais líderes como os setores automotivo, de rolamentos, hidráulico e de matrizes e moldes. Rodas de engrenagem, eixos de engrenagem, anéis de rolamento e outras peças de transmissão são normalmente usinadas por torneamento, enquanto a fresagem domina a indústria de moldes e matrizes (GRZESIK, 2008).

Em geral, estas operações podem fornecer uma precisão relativamente alta para muitas peças duras, mas às vezes surgem problemas importantes com a integridade da superfície, especialmente com padrões indesejáveis de tensões residuais e as mudanças na microestrutura da peça, reduzindo a vida em fadiga de superfícies usinadas. Tradicionalmente, as operações de acabamento nesse tipo de material são realizadas por meio de retificação, mas recentemente, operações utilizando ferramentas de corte com geometrias definidas têm se tornado cada vez mais capazes, além de oferecerem vantagens ao processo de retificação, visto que são operações mais rápidas, oferecem maior flexibilidade de produção, operações de desbaste e acabamento podem ser realizadas na mesma máquina-ferramenta, e múltiplas operações de fresamento são mais fáceis de serem automatizadas (GRZESIK, 2008).

Em particular, o processo de usinagem de materiais duros com altas velocidades de corte podem muitas vezes cortar custos de fabricação, diminuir o tempo de produção (*lead time*) e melhorar a qualidade geral do produto (MAGALHÃES, 2017). As vantagens da usinagem de ligas endurecidas especificadas anteriormente levam a um encurtamento substancial da cadeia tecnológica tradicional com tratamento térmico e operações de acabamento após a operação de desbaste, conforme ilustrado na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Cadeias tecnológicas para o processo de produção convencional (a) e processo de produção com operações de usinagem endurecida (b)



Fonte: DAVIM (2008)

2.7 Estado da Arte

DANIYAN *et al.* (2019) apresentaram um estudo para otimizar largura de corte, força de corte, profundidade de corte e taxa de avanço para o fresamento de AISI P20. O delineamento numérico foi realizado utilizando-se o Ambiente Abaqus Completo (CAE) e a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM). Com base na combinação viável dos parâmetros de usinagem do experimento numérico, a operação de fresagem do AISI P20 foi realizada na fresadora DMU 80 limitada a uma carga máxima de 900 kg. Os valores resultantes da força de corte, momento da força e tempo de usinagem foram obtidos através do sistema de aquisição de dados. A análise dos resultados levou à formulação de um modelo preditivo que correlaciona a taxa de remoção de material em função dos parâmetros independentes do processo de usinagem. Os resultados obtidos também indicam que um projeto de processo adequado e controle do processo de fresagem reduzem o tempo total de fabricação e aumentam a taxa de remoção de metal.

SOUSA *et al.* (2021) analisaram o desgaste de ferramentas revestidas de TiAlN e TiAlN por PVD com diferentes geometrias, no fresamento do aço ferramenta pré-endurecido W 1.2711, variando avanço e comprimento de corte. Após os testes de fresamento, as ferramentas foram submetidas a uma análise SEM. Os principais

mecanismos de desgaste identificados em ambos os casos foram a adesão e a abrasão, seguidos da delaminação do revestimento, com o desgaste sendo menos significativo nas ferramentas revestidas com TiAlSiN. A morfologia da superfície da ferramenta mostrou uma influência significativa no modo de desgaste dos revestimentos. As melhores condições de usinagem foram estabelecidas, levando em consideração a menor rugosidade superficial obtida na superfície usinada e a menor taxa de desgaste da ferramenta.

DA SILVA *et al.* (2011) apresentaram um estudo comparativo da influência de dois ambientes de usinagem (a seco e com lubrificação) no desgaste da ferramenta durante o fresamento de topo de aço AISI 1047 com ferramentas de metal duro. Os resultados mostraram que maiores valores de comprimento usinado e de volume de material removido foram obtidos usando um sistema de lubrificação com fluxo reduzido. Os diferentes comprimentos usinados obtidos se deram principalmente por interações tribológicas existentes entre o conjunto peça-ferramenta-cavaco por cada combinação de velocidade de corte, taxa de avanço e sistema de resfriamento adotados, onde os maiores valores de comprimento usinado registrados foram obtidos quando menores valores de velocidade de corte eram empregados.

SAINI *et al.* (2012) utilizaram a metodologia de modelagem da superfície de resposta (RSM) para prever a rugosidade da superfície e desgaste da ferramenta para uma variedade de condições de corte. Os dados experimentais foram obtidos a partir de experimentos realizados em aço AISI H-11 endurecido. A redução no avanço e o aumento na velocidade de corte resultaram em aumento na qualidade da superfície, no entanto, o aumento na velocidade de corte também produziu um desgaste da ferramenta relativamente maior. A Profundidade de corte não afetou significativamente o desgaste da ferramenta e a rugosidade da superfície.

ZHAO *et al.* (2011) esclarecem que a velocidade de corte exerce o efeito majoritário no desgaste da ferramenta, seguido pela taxa de avanço e por último pela profundidade axial de corte. Também relatam que a força de corte no final da vida da ferramenta é quase o dobro da força de corte quando o gume está afiado. KOSHY *et al.* (2002) encontraram que o efeito da velocidade de corte na vida útil da ferramenta é mínimo na faixa de velocidade testada (50 – 150 m/min) quando insertos de PCBN revestidos com TiCN eram empregados no fresamento de alta velocidade do aço AISI D2 (58 HRC).

ZHOU *et al.* (2014) conduziram operações de fresamento da liga Ti – 6Al – 4V em altas velocidades de corte usando ferramentas de metal duro revestidas e não revestidas. Os resultados obtidos mostram que a força de corte aumenta significativamente em velocidades de corte mais altas, quer a ferramenta de carboneto não seja revestida ou revestida com TiN/TiAlN por PVD. Para ferramentas não revestidas, a temperatura média do flanco é quase constante e nenhum desgaste por abrasão ou fadiga óbvio pode ser observado. No entanto, para ferramentas com revestimento PVD TiN/TiAlN, a temperatura média do flanco sempre aumenta com o aumento da velocidade de corte e pode ser observado um sério desgaste por abrasão.

VARDHAN *et al.* (2017) realizaram uma tentativa de otimizar parâmetros como velocidade de corte, avanço, raio de ponta, profundidade axial de corte e profundidade radial de corte do aço P20 em fresamento CNC usando a Metodologia de superfície de resposta e o método Taguchi através do software Design Expert. Este artigo se concentra na análise das condições de corte ideais para obter menor rugosidade superficial e maior taxa de remoção de material. Foi observado que os valores otimizados dos parâmetros são semelhantes tanto na metodologia de superfície de resposta quanto no método de Taguchi. Os resultados mostram que ambos os métodos podem determinar os valores otimizados dos parâmetros de fresamento.

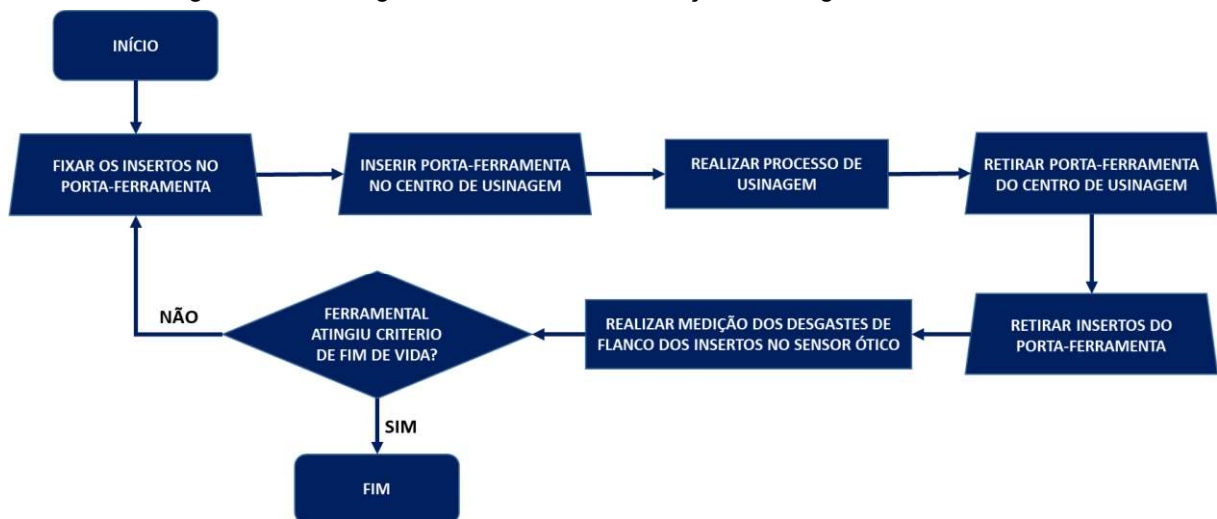
PIVETTA *et al.* (2005) verificaram a influência da relação comprimento/diâmetro da ferramenta (balanço), da rugosidade da operação anterior e da velocidade de corte na rugosidade da peça e na vida da ferramenta no fresamento para acabamento. Para isto foram realizados ensaios de fresamento em aço endurecido AISI D2 (58 HRC) com ferramenta de ponta esférica de metal duro recoberto, variando-se os citados parâmetros de influência. Dentre as conclusões deste trabalho foram destacadas que nem a rugosidade da operação anterior, nem o balanço da ferramenta influenciaram a rugosidade da peça, pelo menos nos níveis utilizados neste trabalho. Com o balanço da ferramenta pequeno, consegue-se baixos valores de desgaste e, com isso, longa vida da ferramenta, mas quando se utiliza conjuntamente alto balanço da ferramenta e velocidades de corte altas, a vida da ferramenta é bastante reduzida.

3 METODOLOGIA

Este capítulo traz uma descrição do material usinado, das ferramentas, equipamentos e métodos utilizados na realização dos experimentos, assim como a sistemática presente neste trabalho. O procedimento experimental consiste na avaliação da evolução do desgaste de flanco de insertos de metal duro revestidos em TiAlCrN por PVD (*Physical Vapour Deposition*) até que o critério de fim de vida estipulado seja alcançado no fresamento de topo do aço AISI O1, onde o desgaste é avaliado após um tempo determinado de corte.

O ciclo de avaliação do desgaste de ferramenta é representado pelo fluxograma da Figura 3.1. O desgaste de flanco VB_Bmax será utilizado como critério de fim de vida dos insertos conforme descrito na norma ISO 8688:1989.

Figura 3.1 - Fluxograma do ensaio de avaliação do desgaste de ferramenta



(Fonte: Autor)

3.1 Material usinado

O material empregado nos experimentos foi o aço liga AISI O1 (também chamado de VND por boa parte das indústrias metalúrgicas nacionais), no estado temperado e revenido com dureza de 57 ± 1 HRC, na forma de bloco, nas dimensões $103 \times 122 \times 55$ mm (Figura 3.2).

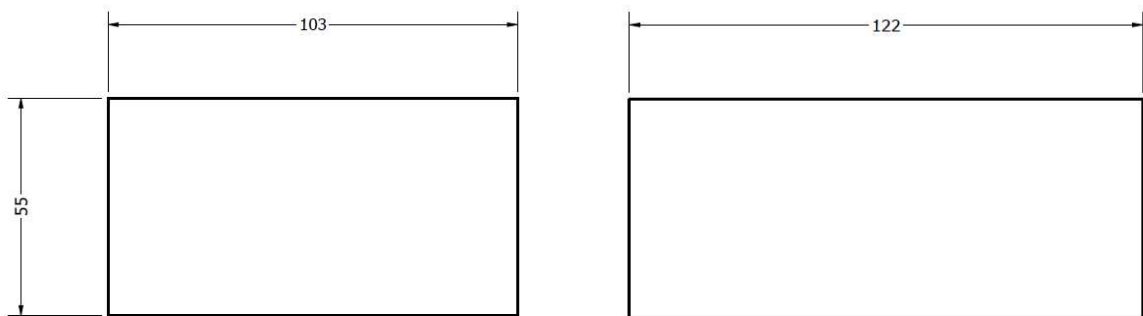
Quanto a variação da dureza em relação as dimensões do bloco, foi realizada a medição do perfil de dureza ao longo do comprimento da peça (Figura 3.3), cujos valores são mostrados na Tabela 3.1. Para a realização desse ensaio foi utilizado o

durômetro da marca TIME TH-320 devidamente calibrado. O Ensaio foi realizado nas dependências da UFAM no Laboratório Metalográfico da Faculdade de Tecnologia. O penetrador utilizado foi de esfera de aço de $\varnothing = 3,175\text{mm}$ para a indentação em aços, com a faixa de utilização entre 70 a 100 HRC.

O aço AISI O1 é utilizado em aplicações de ferramental para corte, conformação a frio e em periféricos de ferramentais. Tipicamente empregado no trabalho de aços e metais não-ferrosos como material de fresas, machos, cossinetes, rolos de laminação de rosca, matrizes e punções para corte de chapas para estampagem, trefilação e forjamento. Tem aplicação em moldes de peças fundidas sob pressão, injeção ou compressão, seja de plásticos ou aços (BRUNATTO, 2016).

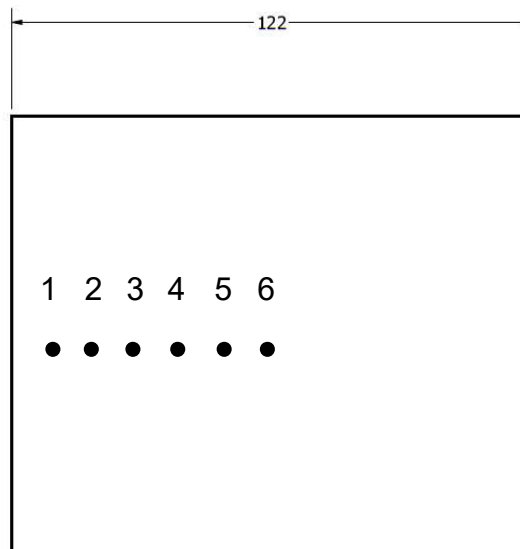
Sua composição química é apresentada na Tabela 3.2.

Figura 3.2 - Dimensões da peça de trabalho



(Fonte: Autor)

Figura 3.3 - Representação esquemática do perfil de dureza do material ensaiado



(Fonte: Autor)

Tabela 3.1 – Valor de dureza do aço AISI O1 ao longo dos pontos de impressão

Pontos	1	2	3	4	5	6
Dureza (HRC)	59	58	58	57	56	56

(Fonte: Autor)

Tabela 3.2 – Composição química do Aço Liga VND (AISI O1)

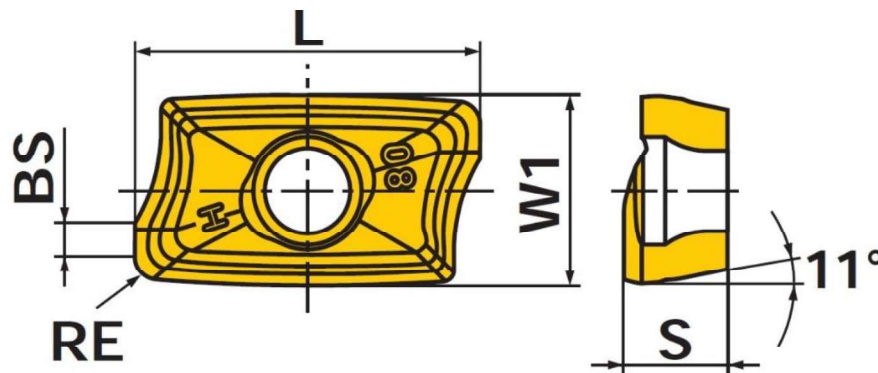
VND (AISI O1)	C	Mn	Si	Ni	Cr	V	W
Conteúdo (%)	0,92	1,2	0,3	0,3	0,5	0,16	0,5

Fonte: BRUNATTO (2016)

3.2 Ferramenta de corte

Em todos os ensaios foram utilizadas pastilhas de metal duro de codificação ISO AOMT123608PEER-H, de modelo APX 3000, de classe MP6120 com revestimento de TiAlCrN por PVD, 0,8mm de raio de quina, de fabricação da Mitsubishi Carbide. A Figura 3.4 e a tabela 3.3 fornecem a geometria e as principais dimensões do inserto, respectivamente.

Figura 3.4 - Geometria do Inseto



Fonte: MITSUBISHI MATERIALS (2020)

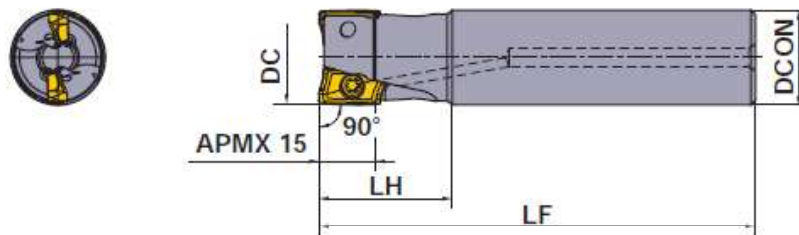
Tabela 3.3 – Dimensões do Inseto

Parâmetro	L	W1	S	BS	RE
Valor (mm)	12	6,6	3,6	1,2	0,8

Fonte: MITSUBISHI MATERIALS (2020)

O suporte utilizado foi APX3000R222SA20LA de 22mm de diâmetro, capacidade para dois insertos e KAPR de 90° também da mesma fabricante. O suporte com os insetos montados possuía 22,5mm de diâmetro e o conjunto ferramenta-porta-ferramentas tem fixação mecânica por interferência. A Figura 3.5 apresenta a geometria do porta-ferramenta, onde as dimensões são mostradas na Tabela 3.4.

Figura 3.5 - Geometria do Porta-Ferramenta



Fonte: MITSUBISHI MATERIALS (2020)

Tabela 3.4 – Dimensões do suporte

Parâmetro	DC	DCON	LF	LH
Valor (mm)	22	20	150	30

Fonte: MITSUBISHI MATERIALS (2020)

3.3 Equipamentos

Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem vertical da Linha ROMI D800, com comando CNC SIEMENS 828D integrado, com curso dos eixos da mesa de 800mm, rotação máxima de 8000rpm e motor principal de 16,5 kW, do laboratório de usinagem da Universidade Federal do Amazonas (Figura 3.6).

Para a ampliação, medição e aquisição das imagens dos desgastes de ferramenta, foi utilizado o sistema ótico de medição do modelo OLM 3020, fabricante Hexagon, do laboratório de metrologia da Universidade Federal do Amazonas, com incerteza de medição de $0,3 \pm L/150 \mu\text{m}$, ampliação de 30x a 180x e resolução de 0,05 μm (Figura 3.7).

Figura 3.6 - Centro de Usinagem CNC ROMI D800



(Fonte: Autor)

Figura 3.7 - Sistema óptico de medição OLM 3020 Hexagon



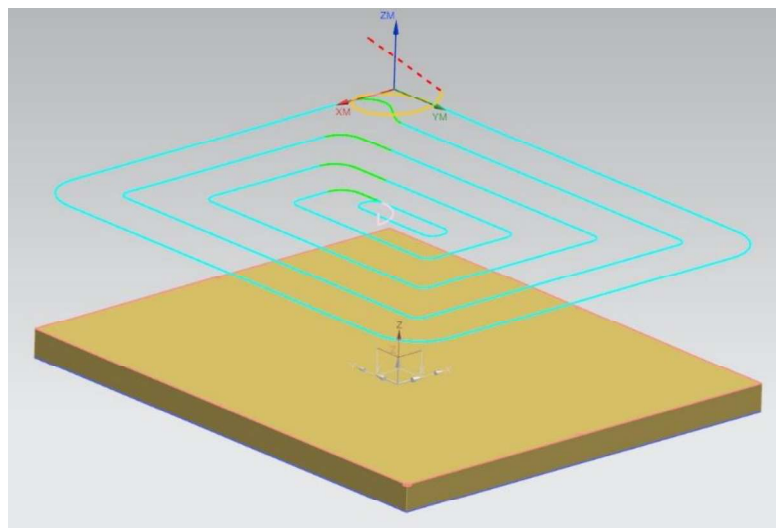
(Fonte: Autor)

3.4 Procedimento

O procedimento experimental consistiu no fresamento frontal do aço AISI O1 endurecido com insertos de metal duro, revestidos em TiAlCrN por PVD. O Processo era interrompido após um comprimento específico de corte de 1,1m para que os valores de desgaste de flanco dos insertos de metal duro fossem obtidos via sistema ótico de medição do modelo OLM 3020, com isto se repetindo até que o critério de fim de vida pré-estabelecido fosse alcançado. Os ensaios foram realizados com fluido de corte semissintético emulsionável em água, aplicado com vazão constante de 18 *l/min*, circulando no sistema de refrigeração de corte com pressão de 5 bar.

A trajetória da fresa foi obtida com o auxílio do software CAD/CAM NX10,0, onde o eixo da fresa é perpendicular à superfície usinada. A entrada da ferramenta na peça foi executada em ângulo e em espiral, conforme representado pelas linhas tracejada em vermelho e em amarelo, respectivamente, na figura 3.8. Os parâmetros do movimento de entrada da fresa no plano de trabalho estão descritos na tabela 3.5.

Figura 3.8 - Imagem retirada de Software CAD/CAM NX10 do percurso da fresa durante o corte do aço AISI01



(Fonte: Autor)

O modo operante de corte das operações de fresamento foi combinado com predominância de corte concordante, onde a espessura máxima de cavaco se dá no início do corte, de maneira a minimizar a forças sobre os insertos e eliminar fatores que possam interferir na análise da progressão do mecanismo de desgaste dos insertos.

Tabela 3.5 – Parâmetros do movimento de entrada da fresa no plano de trabalho

Variáveis	Valores	Unidades
Angulação de entrada	5	°
Raio da espiral	45	mm
Altura da espiral	3	mm

(Fonte: Autor)

Ao total, neste procedimento experimental foram realizados quatro ensaios, divididos em duas etapas. Na primeira etapa foram realizados três ensaios, com critério de fim de vida de $VB_Bmax = 0,5mm$, com os valores de velocidade de corte variados entre $60 m/min$, $80 m/min$ e $100 m/min$, respectivamente. Na segunda etapa foi realizado apenas um ensaio, com critério de fim de vida $VB_Bmax = 0,8mm$ e velocidade de corte de $50 m/min$. Gumes novos foram utilizados em todos os ensaios, possibilitando a visualização da progressão do desgaste de ferramenta até o fim de sua vida útil.

3.4.1 Ensaio com critério de fim de vida de $VB_Bmax = 0,5mm$

Nesta fase dos ensaios, os critérios de fim de vida dos insertos foram baseados na norma ISO-8688, sendo estes:

- Desgaste uniforme de flanco $VB = 0,3mm$.
- Desgaste localizado de flanco $VB_Bmax = 0,5mm$.
- Lascamento excessivo ou fratura, caracterizando uma falha catastrófica.

Os parâmetros de corte são descritos na tabela 3.6, no qual profundidade de corte, profundidade radial de corte e avanço por dente são mantidos fixos em todos os ensaios, com a velocidade de corte sendo variada em $60 m/min$, $80 m/min$ e $100 m/min$, respectivamente.

Ao final de um comprimento usinado de 1,1m, ambos os insertos eram encaminhados ao Sensor Ótico de Medição para obtenção dos valores de desgaste de flanco até o critério de fim de vida $VB_Bmax = 0,5mm$.

Tabela 3.6 – Parâmetros de corte para ensaio de vida útil da ferramenta.

Variáveis	Valores	Unidades
Profundidade de corte (ap)	0,4	mm
Profundidade radial de corte (ae)	70	%
Avanço por dente (fz)	0,1	mm

(Fonte: Autor)

3.4.2 Ensaio com critério de fim de vida de $VB_Bmax = 0,8mm$

Na segunda etapa, foi realizado um único ensaio do qual os parâmetros de corte são mostrados na tabela 3.7. Para este ensaio foi adotado um valor de velocidade de corte de $50 m/min$ e o valor de ap foi mantido $0,4mm$, enquanto ae e fz foram reduzidos com o intuito de se prolongar a vida da ferramenta. Os critérios de fim de vida também foram alterados, a fim de se avaliar as condições de corte para um valor maior desgaste de flanco VB_Bmax , visto que, em situações cotidianas, os ferramentais de usinagem são submetidos a valores de desgastes maiores. Os critérios de fim de vida adotados para este ensaio podem ser visualizados a seguir:

- Desgaste localizado de flanco $VB_Bmax = 0,8mm$.
- Lascamento excessivo ou fratura, caracterizando uma falha catastrófica.

Tabela 3.7 – Parâmetros de corte para segunda etapa do ensaio de vida da ferramenta.

Variáveis	Valores	Unidades
Profundidade de corte (ap)	0,4	mm
Profundidade radial de corte (ae)	60	%
Avanço por dente (fz)	0,075	mm
Velocidade de corte (Vc)	50	m/min
Rotação do fuso	723	RPM

(Fonte: Autor)

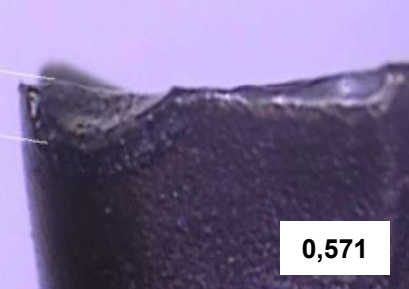
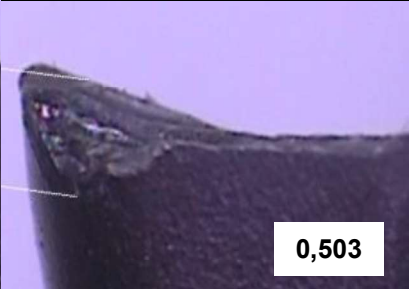

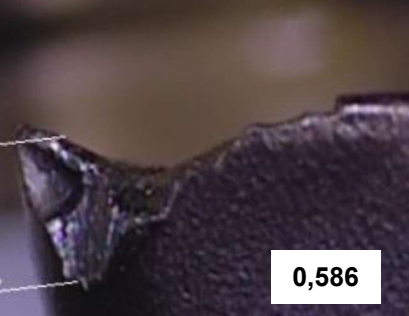
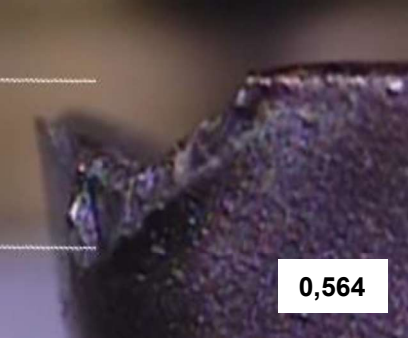
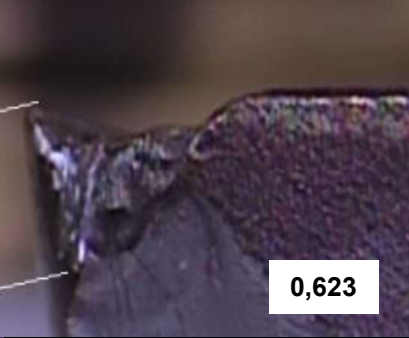
Após um comprimento específico de corte de $L_p = 1,1m$ e um tempo parcial de corte τ_p , os insertos eram levados ao S.O.M. para avaliação do desgaste. Caso não tivessem alcançado o critério de fim de vida estabelecido de $VB_Bmax = 0,8mm$ eram submetidos novamente ao processo de fresamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios já descritos anteriormente. As imagens dos insertos apresentadas foram capturadas com o auxílio do sistema óptico de medição. São apresentados os respectivos valores $VB_B max$ de desgaste de flanco, tempo de corte τ_m , tempo de ciclo τ_p e comprimento total de corte L . As medições dos desgastes $VB_{B1}max$ e $VB_{B2}max$ dizem respeito aos insertos 1 e 2 respectivamente, e foram realizadas com o auxílio do S.O.M juntamente com o software VMS 3.1.

4.1 Resultados dos ensaios de vida útil de ferramenta com $VB_B max = 0,5mm$

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de vida útil de ferramenta com $VB_B max = 0,5mm$

Velocidade de corte	$VB_{B1}max$	$VB_{B2}max$	Resultados
60 <i>m/min</i>	 0,571	 0,503	$L_{60} = 6,9 m$ $\tau_{p60} = 6min50s$ $\tau_{m60} = 41 min$
80 <i>m/min</i>	 0,543	 0,586	$L_{80} = 2,3 m$ $\tau_{p80} = 5min$ $\tau_{m80} = 10 min$
100 <i>m/min</i>	 0,564	 0,623	$L_{100} = 1,15 m$ $\tau_{p100} = 4min$ $\tau_{m100} = 4 min$

(Fonte: Autor)

Constituinte a primeira fase dos experimentos, a tabela 4.1 mostra os resultados dos ensaios de vida útil dos ferramentais para as velocidades de 60 m/min , 80 m/min e 100 m/min , respectivamente. A tabela também contém imagens dos insertos no momento em que atingiram o critério de fim de vida preestabelecido de $VB_Bmax = 0,5\text{mm}$ de desgaste de flanco, além dos respectivos valores de comprimento total de corte L , tempo de ciclo τ_p , e o tempo total de corte τ_m .

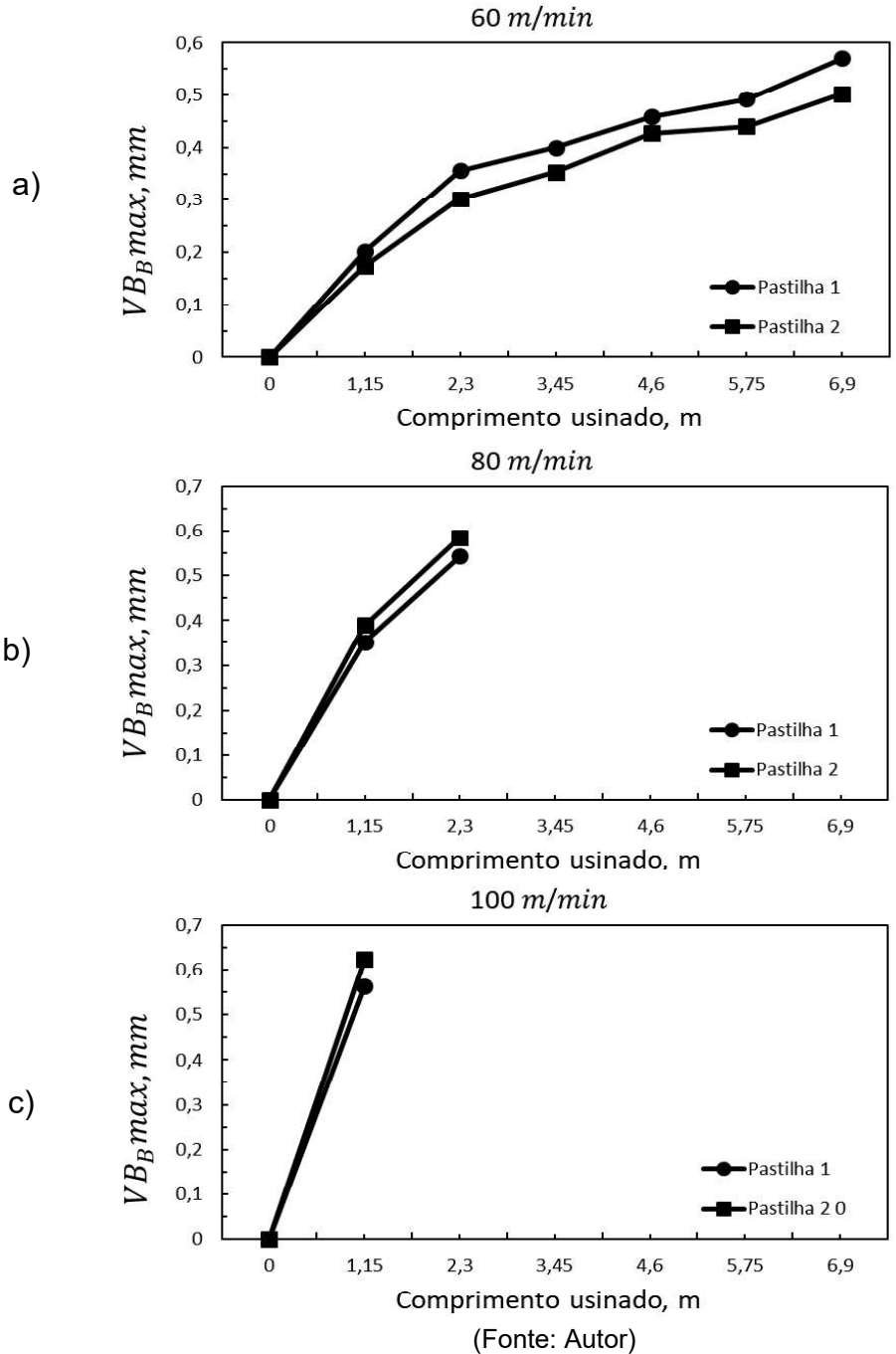
Abrasão se faz presente como o mecanismo de desgaste nos insertos e é de fácil visualização. É visível que, com o aumento da velocidade de corte, a ferramenta apresenta lascamentos. Valores de velocidades de corte acima de 80 m/min ocasionaram lascamentos excessivos e falha catastrófica do inserto, provavelmente devido a trincas de origem mecânica. Estudos similares de análise de desgaste de insertos de metal duro (SOUSA, 2021) e (ZHOU, 2014), propuseram que este fenômeno se dava por uma mistura de adesão, difusão e perda de material. Ao longo dos ensaios não é observada a formação de gumes postiços ou a aderência de pequenas partículas do material usinado nos insertos, indicando uma resistência ao desgaste por adesão.

A Resistência a adesão observada no ferramental poderia ser consequência da presença do revestimento de TiAlCrN, reduzindo a tendência de que partículas do material usinado se aloquem nos insertos, ou seja, a formação de gumes postiços, mas, mesmo com a suavização do movimento de entrada da ferramenta no plano de trabalho, uma possibilidade é que os lascamentos, na entrada da ferramenta na peça de trabalho, ocasionariam a perda do revestimento.

A figura 4.1(a), (b) e (c) apresenta as curvas que correlacionam os valores dos desgastes de flanco $VB_{B1}max$ e $VB_{B2}max$ dos insertos de metal duro em função do comprimento de corte fresado para os valores de velocidade de corte de 60 m/min , 80 m/min e 100 m/min , respectivamente, até o momento em que o ferramental alcança o critério de final da vida útil pré-estabelecido de $VB_Bmax = 0,5\text{mm}$. Observa-se que, acréscimos na ordem de 20 m/min nos valores de velocidade de corte reduzem drasticamente a vida dos insertos, como visto nos ensaios, onde $Vc = 60\text{ m/min}$ apresentou comprimento usinado de $L_{60} = 6,9\text{m}$; para $Vc = 80\text{ m/min}$, $L_{80} = 2,3\text{m}$; para $Vc = 100\text{ m/min}$, $L_{100} = 1,15\text{m}$. Esses resultados já eram esperados de acordo com a Lei de Taylor. Não foram percebidas grandes diferenças nos valores

de desgaste entre o par de insertos de cada ensaio, indicando uma homogeneidade por parte dos ferramentais.

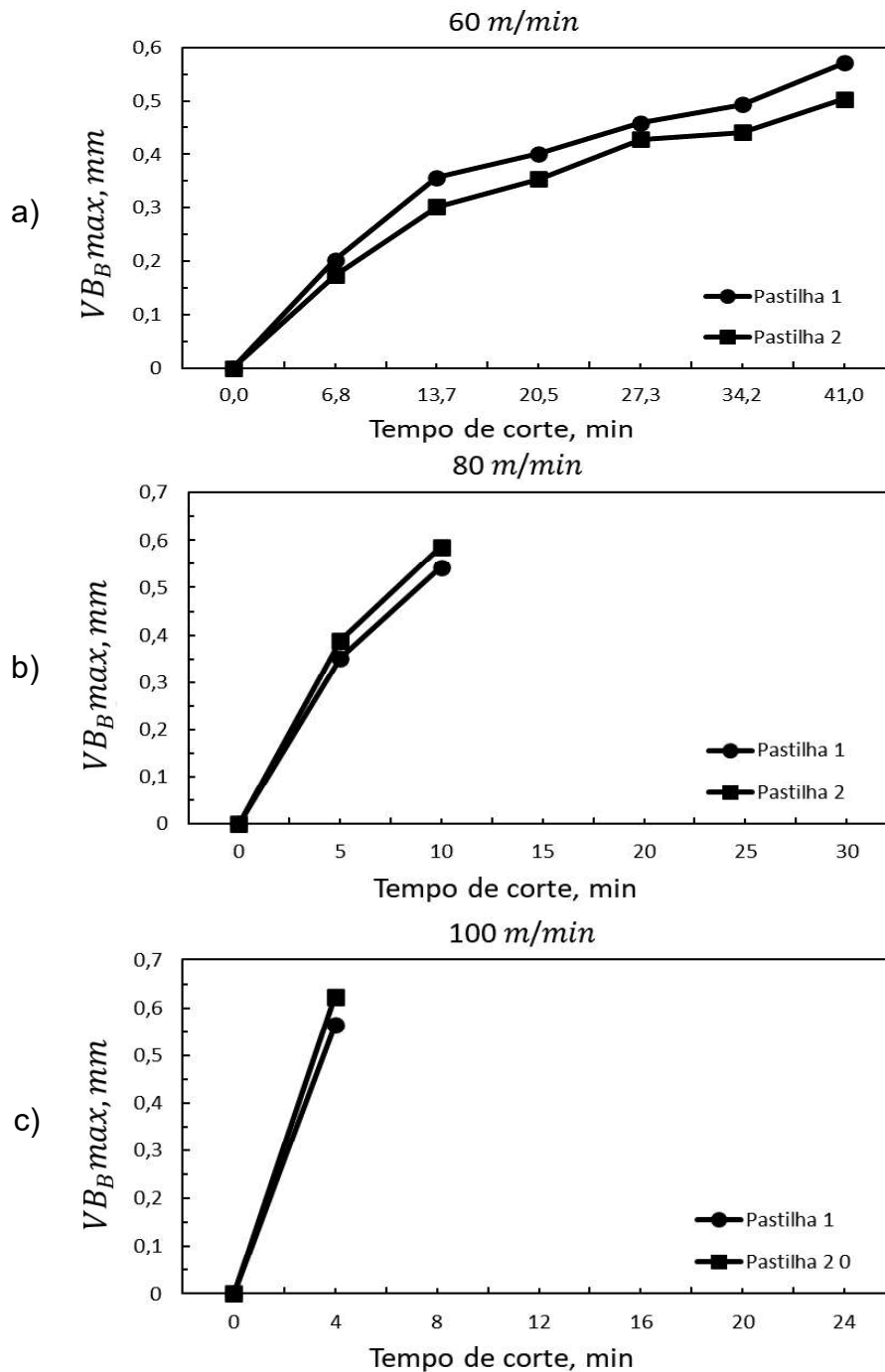
Figura 4.1 - Curvas de desgaste de 60 m/min, 80 m/min e 100 m/min em função de L



A figura 4.2 (a), (b) e (c) apresenta gráficos que correlacionam os valores dos desgastes de flanco dos insertos em função do tempo de corte τ_m . Além de influenciar na vida útil do ferramental, a variação da velocidade de corte altera o tempo do ciclo de usinagem, onde as grandezas são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a velocidade de corte, menor o tempo de ciclo, mas, a fins de tempo de

processo, as mudanças não são de grande impacto, visto que os tempos de ciclo para os ensaios com as velocidades de 60 m/min , 80 m/min e 100 m/min , os tempos de ciclo τ_p foram de $6\text{min}5\text{s}$, 5min e 4min respectivamente, para um comprimento usinado de $1,1\text{m}$.

Figura 4.2 - Curvas de desgaste de 60 m/min , 80 m/min e 100 m/min em função de τ_m



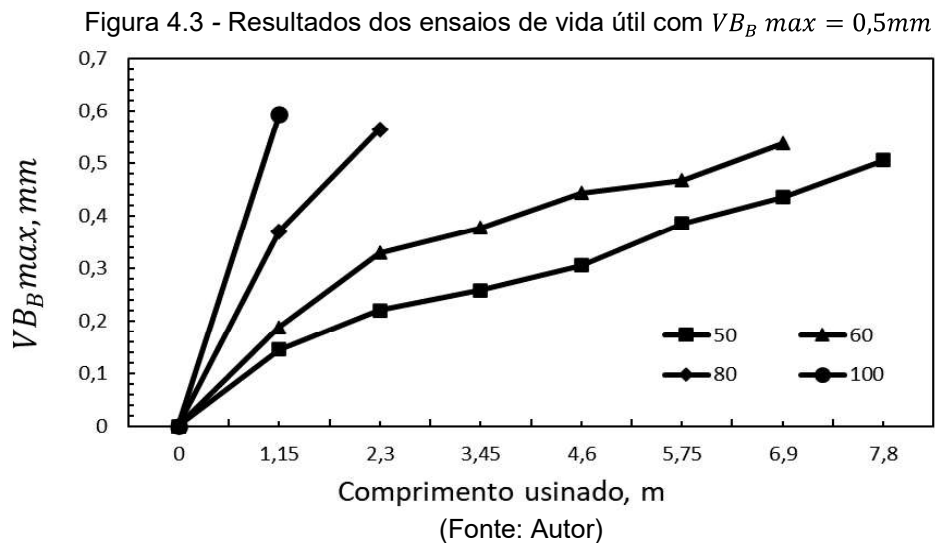
(Fonte: Autor)

Para 100 m/min , decorrente ao lascamento excessivo do inserto há grande redução da vida útil do ferramental. Em comparação com o ensaio para 60 m/min , este último um comprimento usinado L quatro vezes maior.

4.2 Resultados dos ensaios de vida útil de ferramenta com $VB_B\text{ max} = 0,8\text{mm}$

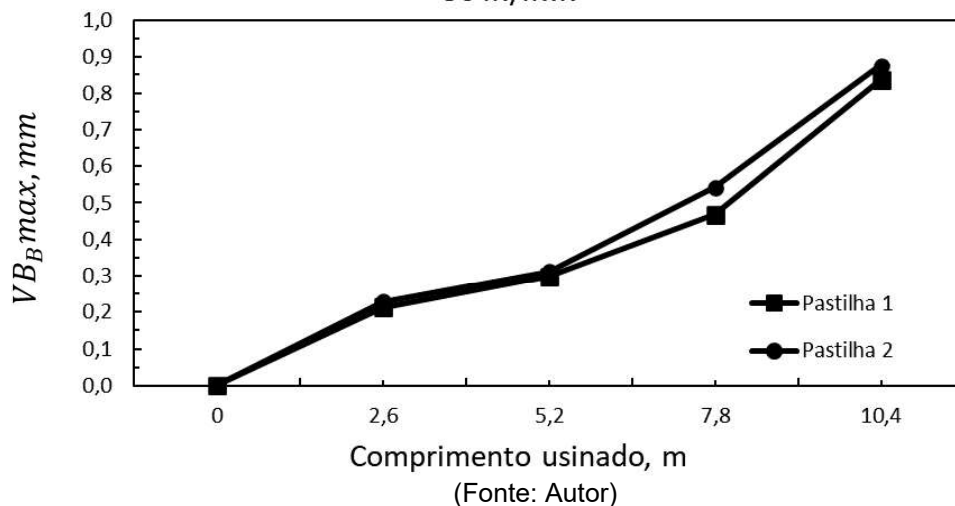
Constituinte a segunda etapa dos experimentos, este ensaio adotou como critério de fim de vida útil um valor de desgaste de flanco maior que o estipulado base norma. É uma pesquisa válida, afinal para operações corriqueiras e cotidianas, essas ferramentas são utilizadas até falhas catastróficas ou desgastes de flanco muito maiores. A tabela 4.2 apresenta a progressão dos valores dos desgastes $VB_{B1}\text{max}$ e $VB_{B2}\text{max}$ até atingirem o critério de fim de vida estipulado de $VB_B\text{max} = 0,8\text{mm}$ de desgaste de flanco. Imagens do insertos durante este processo de progressão dos desgastes e seus respectivos valores de $VB_{B1}\text{max}$ e $VB_{B2}\text{max}$, comprimento de corte L , tempo parcial de corte τ_p e o tempo total de corte τ_m durante o fresamento do aço AISI O1, com velocidade de corte definida de 50 m/min , são apresentados na tabela 4.2.

O comparativo com os ensaios anteriores é realizado na figura 4.3, onde o critério de fim de vida adotado era $VB_B\text{max} = 0,5\text{mm}$, no qual, para este critério, o ferramental alcançou o fim da vida útil com comprimento usinado de $L_{50} = 7,8\text{m}$, seguindo a mesma tendência de aumento da vida útil do ferramental com a redução do valor da velocidade de corte, conforme estipulado pela lei de Taylor.



A figura 4.4 apresenta as curvas que correlacionam os valores de desgastes de flanco $VB_{B1}max$ e $VB_{B2}max$ dos insertos de metal duro em função do comprimento fresado L para o respectivo valor de velocidade de corte até o ponto onde os insertos atingem o critério de fim de vida pré-estabelecido de $VB_Bmax = 0,8mm$.

Figura 4.4 - Curvas de desgaste de $50m/min$ em função de L
 $50 m/min$



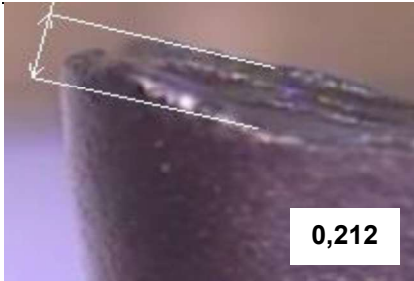
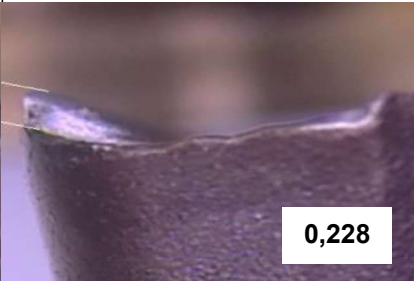
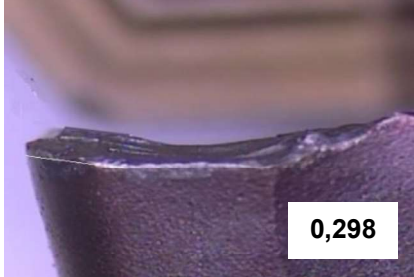
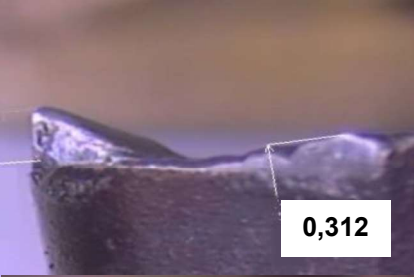
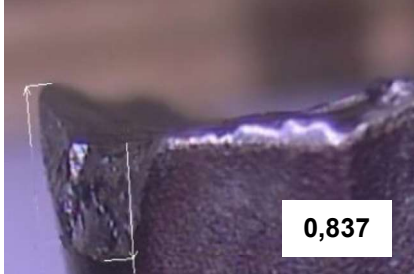
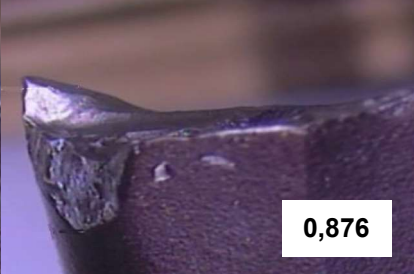
Relativo ao critério de fim de vida $VB_Bmax = 0,8mm$ de desgaste de flanco, este foi ultrapassado com os insertos alcançando $10,4m$ de comprimento usinado total, com um tempo total de corte de $96 minutos$. A respeito do comportamento da curva Desgaste (mm) x Comprimento usinado (m), há regiões em que a mesma apresenta uma curvatura descendente, tendendo a uma estabilidade dos valores de desgaste, como é possível visualizar na faixa compreendida do ponto de início do processo de fresamento até o comprimento usinado de $5,2m$, onde $VB_{B1}max = 0,298mm$ e $VB_{B2}max = 0,312mm$.

A curva também apresenta faixas em que ocorre um comportamento ascendente, ou seja, uma aceleração do aumento dos valores de desgaste, como nas regiões compreendidas entre os valores de $5,2m$ a $10,4m$ de comprimento usinado, região onde os insertos atingiram o critério de fim de vida de $VB_{B1}max = 0,8mm$, indicando uma aceleração da propagação do desgaste quando o mesmo ultrapassou a faixa de $VB_{B1}max = 0,298mm$. Não foram percebidas grandes diferenças nos valores de desgaste entre o par de insertos de cada ensaio, indicando uma homogeneidade por parte dos ferramentais.

Similarmente aos ensaios anteriores, o mecanismo de desgaste abrasivo é majoritário e cresce progressivamente à medida que o tempo de processo se alonga,

se fazendo presentes até o fim da vida útil do ferramental. Não é observada a formação de gumes postigos a aderência de pequenas partículas do material usinado nos insertos, indicando uma resistência ao mecanismo de desgaste de aderência.

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de vida útil de ferramenta com $VB_B \text{ max} = 0,8\text{mm}$

Pastilha 1	Pastilha 2	Resultados
		$L_p = 2,6 \text{ m}$ $\tau_p = 24 \text{ min}$
		$L_p = 5,2 \text{ m}$ $\tau_p = 48 \text{ min}$
		$L_p = 10,4 \text{ m}$ $\tau_p = 96 \text{ min}$

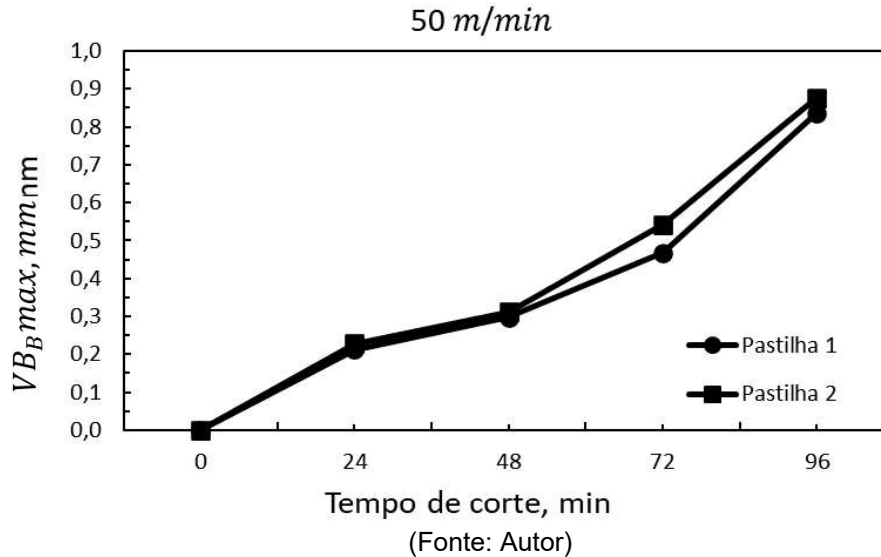
(Fonte: Autor)

O desgaste abrasivo, a medida em que os valores de desgaste de flanco se tornam cada vez maiores, tende a crescer exponencialmente e como consequência, ocasiona um aumento da força de corte, visto que a medida em que o inserto perde a afiação de seu gume, a ferramenta deixa de cortar a peça de trabalho e passa a simplesmente “empurrar” o material usinado, aumentando a força necessária para a realização do processo e consequentemente aumentando a fricção presente na superfície de contato peça-ferramenta e consequentemente a abrasão, podendo justificar o aumento da taxa de desgaste presente após os insertos ultrapassarem o valor de $5,2\text{m}$ de comprimento usinado.

A figura 4.5 apresenta as curvas que correlacionam os valores dos desgastes de flanco $VB_{B1} \text{ max}$ e $VB_{B2} \text{ max}$ dos insertos em função do tempo específico de corte.

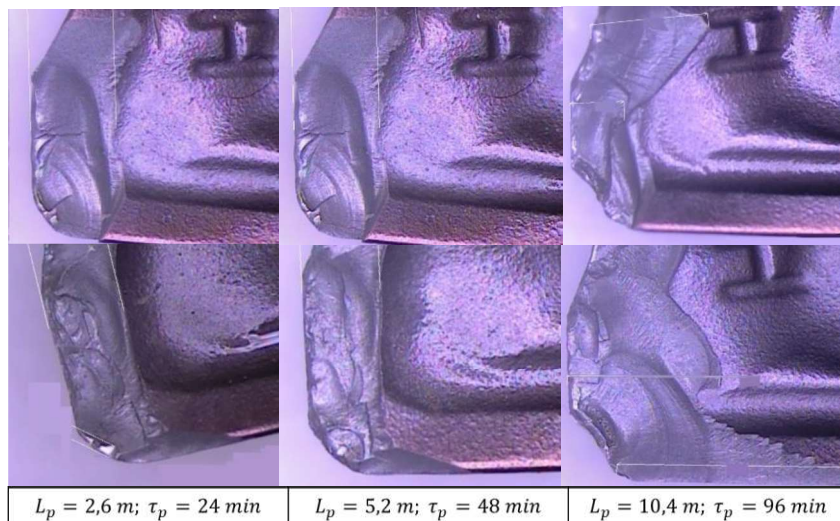
Similar ao comportamento da curva Desgaste (mm) x Comprimento usinado (m), a curva Desgaste (mm) x Tempo de corte (min), apresenta regiões com uma curvatura descendente, tendendo a uma estabilidade dos valores de desgaste, de 0 a 48 min .

Figura 4.5 - Curvas de desgaste de 50 m/min em função de τ_p



A curva também apresenta faixas em que ocorre um comportamento ascendente, ou seja, uma aceleração do crescimento dos valores de desgaste, como nas regiões compreendidas entre os valores de 48 min a 96 min de tempo específico de corte. Os tipos de desgaste que se fazem presentes são: desgastes de flanco e lascamentos. Ao logo do processo de corte foi observada uma alta presença do lascamentos, conforme é possível observar na figura 4.6, onde esta progressão é apresentada na superfície de saída dos insertos em função do comprimento usinado.

Figura 4.6 - Desgaste na superfície de saída.



(Fonte: Autor)

Não foi possível avaliar a existência de desgastes de cratera visto que este se dá por meio do mecanismo de desgaste de difusão. Futuramente os insertos empregados nestes ensaios serão submetidos ao Microscópio eletrônico de varredura com a finalidade de verificar a presença deste tipo de desgaste.

Desgaste de cratera é causado principalmente pelo contato do cavaco com a face do inserto, onde a cratera em expansão na face age como um quase quebra cavaco, recebendo o impacto oriundo do cavaco que é removido da peça de trabalho. O aumento da cratera na face do ferramental resulta em um crescimento natural das forças de corte. Se tratando de ferramentas para fresamento, principalmente para ferramentas de metal duro, os critérios mais comuns são os relativos ao desgaste de flanco médio e máximo, mas outros critérios também podem ser adotados para obtenção do período de vida da ferramenta, como profundidade de cratera ou distância entre flanco e cratera, por exemplo.

A análise do desgaste de cratera de e tanto a sua utilização como critério de fim de vida ficam como sugestão para estudos futuros.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos com o presente trabalho, foi possível fazer as seguintes conclusões:

- Para o fresamento de desbaste do aço AISI O1 com dureza de 57 HRC, valores de velocidades de corte acima de 80 m/min não são aconselhados por causarem lascamentos excessivos e falha catastrófica do inserto, provavelmente devido a trincas de origem mecânica.
- Para 50 m/min , é possível usinar $L = 7,8\text{m}$ e alcançar $\tau_p = 72 \text{ min}$ de vida útil da ferramenta, caso seja considerado um desgaste de flanco médio de $0,5\text{mm}$ como critério de fim de vida.
- Para 50 m/min , é possível usinar $L = 10,4\text{m}$ e alcançar $\tau_p = 96 \text{ min}$ de vida útil da ferramenta, caso seja considerado um desgaste de flanco médio de $0,8\text{mm}$ como critério de fim de vida.
- De acordo com o sistema de inspeção empregado pode-se observar os lascamentos são predominantes, contudo, a matriz exposta e dimensionada apresenta os resquícios de abrasão.
- Durante os ensaios não foi observada a formação de gumes postiços.

Como trabalhos futuros recomenda-se:

- Estudar a influência do ângulo de posição na vida útil do inserto.
- Variar uma maior gama de parâmetros como profundidades de corte e avanços.
- Ampliar o estudo para diferentes materiais de ferramenta bem como revestimentos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. M. **Avaliação do Desgaste da Ferramenta de Metal Duro Revestida com TiN no Fresamento do Aço ABNT 4140 Laminado a Quente e Temperado/Revenido**. 2010. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramentas de metal duro**. 2003. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PROMEC, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6162**: Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ASTAKHOV, V.P. Tools (Geometry and Material) and Tool Wear. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. Opole, v. 1, n. 2, p. 29 – 57. 2008.

BRUNATTO, S. F.; **Introdução ao Estudo Dos Aços. 2016**. Programa de graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em:

<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Silvio/INTRODU%C3%87%C3%83O%20AO%20ESTUDO%20DOS%20A%C3%87OS-Parte%201.pdf>. Acesso em 20 abr. 2021.

CARVALHO, M. P. **Avaliação de tipos e Mecanismos de Desgastes de Broca de Metal Duro Revestidas Por TiN e TiAlN na Furação do Aço ABNT 1045**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2019.

CHENG, Y.H.; BROWNE, T.; HECKERMAN, B. *TiCN* coatings deposited by large area filtered arc deposition technique. **Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films**, [s.l.], v. 28, n. 3, p. 431 - 437. mar. 2010.

DA SILVA, R. B.; VIEIRA, J. M.; CARDOSO, R. N.; CARVALHO, H. C. COSTA, E. S.; MACHADO, A. R.; DE ÁVILA, R. F. Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems, **Wear**, [s.l.], v. 271 p. 2459 - 2465. nov. 2011.

DANIYAN, I. A.; TLHABADIRA, I.; DARAMOLA, O. O.; MPOFU, K. Design and Optimization of Machining Parameters for Effective AISI P20 Removal Rate during Milling Operation. **29th CIRP Design Conference 2019**, Póvoa de Varzim, v. 84, 2019, p. 861 - 867. mai. 2019.

DAVIM, J. P. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. 1. ed. London: Springer, 2008.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9.ed. São Paulo: Editora Artliber, 2013.

FALLQVIST, M.; OLSSON, M.; RUPPI, S. Abrasive wear of multilayer - Al_2O_3 - $Ti(C, N)$ CVD coatings on cemented carbide. **Wear**, Montreal, v. 263, n. 1 - 6, p. 74 - 80. set. 2007.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1970.

GRZESIK, W. Machining of Hard Materials. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. Opole, v. 1, n. 4, p.97 – 123. 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8688-1**. Tool Life Testing in Milling – Part 1: Face Milling. Genebra: ISO. 1989.

ISCAR. **Conceitos básicos de usinagem**, 2001.

KANG, Y.; KANG, S. *WC* - reinforced (*Ti, W*)(*CN*). **Journal of the European Ceramic Society**, [s.l.], v. 30, n. 3, p. 793 - 798. out. 2010.

KIM, G. S.; LEE, S. Y.; HAHN, J. H.; LEE, B. Y.; HAN, J. G.; LEE, J. H.; LEE, S. Y.; Effects of the thickness of *Ti* buffer layer on the mechanical properties of *TiN* coatings. **Surface and Coatings Technology**, Jeju Island, v. 171, n. 1 - 3, p. 83 - 90. jul. 2003.

KONYASHIN I. Y. PVD/CVD technology for coating cemented carbides, **Surface and Coatings Technology**, [s.l.], v. 71, n.3, p. 277 - 283. abr. 1995.

KOSHY, P.; DEWES, R.C.; ASPINWALL, D.K. High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [s.l.], v.127, n. 2, p. 266 - 273. set. 2002

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T. MENDES, A. A. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**, Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 4ª Versão, 1999.

MAGALHÃES, L.C. **Influência do contato entre ferramenta e peça no fresamento de superfícies curvas em ao H13 temperado e revenido**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

MARTINS, P. D. S. **Avaliação do Desgaste de Flanco de Um Inseto Cermet no Torneamento do Aço ABNT 1020**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

MITSUBISHI CARBIDE. **General Catalogue C008B Full Catalogue / Brazil**. 2020. Disponível em:

http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/3815/1675/2646/catalog_c008z_full.pdf

MORANT, C.; Nanomechanical properties of BCN/CN/BN multilayer films, **Diamond and Related Materials**, [s.l.], v. 16, n. 47, p. 1441 - 1444. jun. 2007.

OZEL, T.; ALTAN, T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s.l.], v. 40, n. 1, p. 133 - 52. 2006.

PEIXOTO, A. C. S. **Simulação da Influência de Parâmetros de Usinagem no Fresamento de Topo do Inconel 718 e Validação com Resultados Experimentais**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Uberlândia, Uberlândia, 2019.

PIVETTA, C. S. **UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO FRESAMENTO DE AÇO ENDURECIDO COM FRESA DE TOPO ESFÉRICO**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, 2005. 110p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

RAJABI, A.; GHAZALI, M. J.; DAUD, A. R. Chemical composition, microstructure and sintering temperature modifications on mechanical properties of *TiC*-based cermet, **Journal of Materials and Design**, [s.l.], v. 67, n. 1, p. 95 - 106. fev. 2015.

SAINI, S.; AHUJA, I. S.; SHARMA V. S.; Influence of Cutting Parameters on Tool Wear and Surface Roughness in Hard Turning of AISI H11 Tool Steel using Ceramic Tools. **International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing**, v. 13, n. 8, p. 1295 - 1302. ago. 2012.

SANDVIK COROMANT. **METALWORKING WORLD**. 2021. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/mww/pages/default.aspx>. Acesso em: 20 junho 2021.

SOUSA, V. F. C.; SILVA, F. J. G.; ALEXANDRE, R.; FECHEIRA, J. S.; SILVA, F. P. N. Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel, **Wear**, [s.l.], v. 482, a. 203695. fev. 2021.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 4. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.

Taylor F.W.; **On the art of cutting metals**. 1. ed. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1907.

TIAN, X.; ZHAO, J.; JIABANG, Z.; ZHAOCHAO, G.; DONG, Y. Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 69, p. 2669 - 2678. 2013.

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

VARDHAN, M. V.; SANKARAIHAH, G.; YOHAN, M.; RAO, H. J. Optimization of Parameters in CNC milling of P20 steel using Response Surface methodology and Taguchi Method. **International Conference on Advancements in Aeromechanical Materials for Manufacturing**. Hyderabad, 00v. 4, n. 8. p. 9163 – 9169. out. 2017.

VITÓRIA, B. C. R. **Análise do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento do Aço AISI 4340 Através do Sinal de Vibração**. 2016. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

WANG, W.; WONG, Y. S.; HONG, G. S. Flank wear measurement by successive image analysis, **Computers in Industry**, [s.l.], v. 56, n. 8 - 9, p. 816 - 830. dez. 2005.

WU, C. H.; CHIEN, C. H.; Influence of lubrication type and process conditions on milling performance. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s.l.], v. 221, n. 5. p. 835 – 843. mai. 2007.

ZHOU, W.; HOU, J.; HONGJIAN, D.; YANG, XU, H.; ZHAO, N. Influence of cutting speed on cutting force, flank temperature and tool wear in end milling of Ti-6Al-4V alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 70, p. 1835 - 1845. nov. 2014.