

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Guilherme Duca Bustamante

**INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES DA PEÇA NA EVOLUÇÃO DO DESGASTE DE
FERRAMENTAS DE CORTE NO PROCESSO DE FRESAMENTO**

Belo Horizonte

Abril de 2017

Guilherme Duca Bustamante

**Influência das Dimensões da Peça na Evolução do Desgaste de Ferramentas
de Corte no Processo de Fresamento**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Sandro Cardoso Santos

Belo Horizonte
Abril de 2017

Bustamante, Guilherme Duca.
B982i Influência das dimensões da peça na evolução do desgaste de
ferramentas de corte no processo de fresamento / Guilherme Duca
Bustamante. - 2017.
94 f. : il.; tabs. ; grafs ; fotos. –

Orientador: Sandro Cardoso Santos.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2017.
Bibliografia.

1. Fresagem. 2. Desgaste dos materiais. 3. Ferramentas para
cortar metais. 4. Aço. I. Santos, Sandro Cardoso. II. Título.

CDD: 620.11292



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

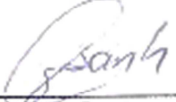
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES DA PEÇA NA
EVOLUÇÃO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE
CORTE NO PROCESSO DE FRESAMENTO”

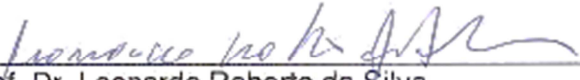
Autor: Guilherme Duca Bustamante

Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

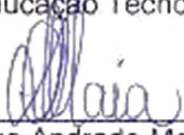
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Luis Henrique Andrade Maia
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC-MG

Belo Horizonte, 25 de Abril de 2017.

Dedico este trabalho aos meus pais Paulo e Patrícia e à minha irmã Paula pelo amor incondicional.

“Onde há uma vontade forte, não pode haver grandes dificuldades.”

(Nicolau Maquiavel).

AGRADECIMENTOS

À Deus e aos familiares que sempre nos dão força e motivação para seguir adiante.

Ao orientador Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos pela oportunidade e confiança no desenvolvimento do trabalho.

Ao Aldeci Santos, colaborador da Sandvik Coromant, que forneceu as ferramentas utilizadas no trabalho.

Aos funcionários do CEFET-MG Marcelo Ferreira e Wenceslau Barbosa que forneceram todo o suporte durante a prática experimental.

Aos estagiários do Laboratório de Caracterização e Microscopia pela colaboração na operação dos equipamentos.

Aos alunos Paulo Figueiredo e Flávio Pacelli companheiros de jornada.

Aos amigos do mestrado: Bruna, Júlio, Lucas, Luís, Nayara e Natália que foram pessoas essenciais em todo o processo.

Ao Prof. Leonardo Roberto da Silva, Prof. Frederico Romagnoli Silveira Lima e Prof. Yukio Shigaki membros da banca de qualificação que deram importantes sugestões para a sequência do trabalho.

Ao CEFET-MG por disponibilizar os meios necessários para a realização do trabalho.

Ao Prof. Eduardo Schirm e Prof. Márcio Machado sempre interessados em contribuir de alguma forma.

À Prof^a. Gisele Mol pelo auxílio durante o ensaio de dureza.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À todos os professores e colegas que enriqueceram minha formação durante o mestrado através dos conhecimentos e experiências transmitidas.

Enfim, à todos aqueles que de alguma forma foram presentes durante todo esse tempo e contribuíram para a conclusão do trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os processos de usinagem apresentam inúmeras variáveis que necessitam de maior investigação para melhor compreensão do comportamento na interface peça e ferramenta de corte. Dentre os processos, destaca-se o fresamento muito utilizado nas indústrias caracterizado pela alta taxa de remoção de material e corte interrompido. A característica interrompida do fresamento submete a ferramenta de corte a flutuações de cargas mecânicas e térmicas, que promovem o aparecimento de uma série de desgastes e avarias nesta. O número de entradas e saídas da ferramenta geram ciclos térmicos que a deixa mais suscetível à fragilização. Dentre as avarias, as trincas de origem térmica são particularmente importantes. Neste trabalho foi avaliada a influência do número de entradas e saídas da ferramenta de corte relacionada com a dimensão da peça no desgaste de ferramentas de metal duro no processo de fresamento. Para isso, fixaram-se todos os parâmetros de corte e barras de aço SAE1045 com diferentes comprimentos foram fresadas com aplicação de ferramentas de metal duro com diferentes tenacidades. Após a usinagem das peças, as ferramentas foram analisadas por meio de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura com a identificação e quantificação das formas e mecanismos de desgaste além do desempenho de cada tipo de ferramenta. Em geral, observou-se o número de entradas e saídas da ferramenta sobre a peça como fator de maior relevância na evolução do desgaste. Dentro de cada classe de ferramenta, a diferença de desgaste da ferramenta de corte de uma peça de maior comprimento para uma de menor é pouco significativo para o ciclo de corte realizado. O desempenho das ferramentas foram semelhantes com um maior desgaste identificado na classe de menor tenacidade.

Palavras-chave: Fresamento, fresamento frontal, desgaste, número de entradas e saída, ferramentas de metal duro, dimensão da peça.

ABSTRACT

Machining processes have many variables that need more research to better understand the behavior at the interface workpiece and cutting tool. Among the processes, milling is widely used in industries characterized by high rate of material removal and interrupted cutting. The interrupted characteristic of milling undergoes fluctuations of mechanical and thermal loads in the tool that promote the appearance of a series of wear and damages. The tool number of inputs and outputs generate thermal cycles that leaves more susceptible to weakening. Among damages, thermal cracks are particularly important. This work verified the influence of the number of inputs and outputs related to the size of the workpiece in the wear of carbide tools in the milling process. For this, all cutting parameters were set and SAE1045 steel bars with different lengths were milled with the application of carbide tools of different toughness. After machining of workpieces, the tools were analyzed by optical microscopy and scanning electron microscopy with the identification and quantification of shapes and wear mechanisms beyond the performance of each type of tool. In general, it was observed the number of entries and exits of the tool on the part as a factor of greater relevance in the evolution of the wear. Within each tool class, the wear difference of the cutting tool from a piece of longer length to a smaller one is insignificant for the cutting cycle performed. The performance of the tools were similar with higher wear identified in the lower tenacity class.

Keywords: milling, face milling, wear, carbide tools, number of entries and exits workpiece dimension.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos básicos de fresas e operações de fresamento. (a) Fresamento tangencial; (b) fresamento frontal; (c) fresamento de topo.....	20
Figura 2 – Fase ativa e inativa no processo de fresamento tangencial discordante.	21
Figura 3 – Penetração de trabalho (a_e), profundidade de corte (a_p) e penetração de avanço (a_f).....	22
Figura 4 – Representação da velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_f), velocidade efetiva (v_e), ângulo da direção de avanço (φ) e ângulo da direção efetiva de corte (η) no fresamento tangencial discordante.	24
Figura 5 – Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e) no fresamento tangencial discordante.....	25
Figura 6 – Processo de fresamento frontal e suas características.	26
Figura 7 – Geometria dos principais ângulos no fresamento frontal.	27
Figura 8 – Fresa a (a) 90°, (b) 45°, (c) 60° a 75°, (d) 10° e (e) ferramentas redondas.	28
Figura 9 – Representação da (a) entrada e (b) saída da ferramenta de corte no processo de fresamento.....	29
Figura 10 – Operação de fresamento em múltiplos passes	30
Figura 11 – Representação da posição de início de corte	31
Figura 12 – Quadro demonstrativo dos materiais para ferramentas.	33
Figura 13 – Dureza Vickers (HV) em diferentes temperaturas para o WC, TiC, TaC e NbC.	35
Figura 14 – Revestimentos modernos para ferramentas de metal duro.....	38
Figura 15 – Microestrutura do metal duro e seus revestimentos.....	39
Figura 16 – Mecanismos de desgaste de corte em função da temperatura.....	42
Figura 17 – Principais áreas e formas de desgaste de uma ferramenta de corte.	43
Figura 18 – Formas de desgaste em uma ferramenta de corte.....	44
Figura 19 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.	45
Figura 20 – Trincas térmicas em uma ferramenta de metal duro.....	46
Figura 21 – Variação da temperatura de corte ao longo do processo de fresamento.	47
Figura 22 – Distribuição da temperatura e das tensões na ferramenta de metal duro de uma fresa.	48

Figura 23 – Controle da temperatura da aresta de corte.....	49
Figura 24 – Durabilidade da ferramenta durante o corte interrompido em função da temperatura de aquecimento.....	50
Figura 25 – Fluxograma da sequência dos procedimentos.....	55
Figura 26 – Representação (a) esquemática e (b) real dos corpos de prova.....	56
Figura 27 – (a) Ensaio de Dureza Brinell e (b) Durômetro.	57
Figura 28 – Fresadora ferramenta Diplommat FVF 3000.....	58
Figura 29 – Corpo de prova fixado na mesa da fresadora.	59
Figura 30 – Representação (a) esquemática e (b) real das ferramentas de metal duro classe 4220 e 4240.	59
Figura 31 – Parâmetros e condições de usinagem recomendadas para classe 4220.	61
Figura 32 – Substrato e camada de revestimento das ferramentas de corte classe (a) P20 e (b) P40.	62
Figura 33 – Representação (a) esquemática e (b) real da fresa CoroMill 490.	62
Figura 34 – (a) Microscópio de medição Zeiss BK 70X50 e (b) Câmera Samsung 16MP.....	63
Figura 35 – Microscópio eletrônico de varredura Shimadzu SSX-550.	64
Figura 36 – Representação da alavanca de avanço rápido da mesa.....	65
Figura 37 – (a) Potenciômetro ajustado e (b) Tacômetro digital com mira laser.	67
Figura 38 – Recomendações de velocidade de corte e de classe referentes à dureza do material.....	68
Figura 39 – Representação esquemática da (a) vista superior e (b) vista lateral do ensaio de fresamento frontal para L = 400 mm.....	70
Figura 40 – Marcas identificadoras da classe e aresta de corte da ferramenta.	71
Figura 41 – Posições ocupadas pelas ferramentas de corte na fresa.....	71
Figura 42 – $VB_{BMÁX}$ para as ferramentas (a) 9, (b) 10, (c) 11 e (d) 12 classe P20, L= 400 mm após 15 passes.	73
Figura 43– Porta-amostra e suporte pra ferramentas de fresamento utilizados no MEV.	74
Figura 44– Desgaste de flanco máximo ($VB_{BMÁX}$) em função do número de passes para a ferramenta P20 para diferentes comprimentos do corpo de prova.	77
Figura 45– Desgaste de flanco máximo ($VB_{BMÁX}$) em função do número de passes para a ferramenta P40 para diferentes comprimentos do corpo de prova.	81
Figura 46– Desgaste de flanco máximo ($VB_{BMÁX}$) em função do número de passes para as classes P20 e P40 para diferentes comprimentos do corpo de prova.....	83

Figura 47 – Aspectos dos desgastes das ferramentas de metal duro classe P20 após 21 passes sobre o corpo de (a) 200 mm e (b) 400 mm com ampliação de 120x.	84
Figura 48 – Aspectos dos desgastes das ferramentas de metal duro classe P40 após 21 passes sobre o corpo de (a) 200 mm e (b) 400 mm com ampliação de 120x.	85
Figura 49 – Lascamento da ferramenta P20 durante realização de pré-testes.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos metais duros segundo a Norma ISO 513.	36
Tabela 2 – Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD....	39
Tabela 3 – Critério de Chauvenet para rejeição de dados discrepantes.	52
Tabela 4 – Composição química (% em peso) do aço SAE 1045 utilizado no trabalho.	56
Tabela 5 – Dados técnicos da fresadora ferramenteira Diplomat FVF 3000.....	58
Tabela 6 – Especificações das ferramentas de metal duro classe 4220 e 4240.....	60
Tabela 7 – Especificações da fresa CoroMill 490.....	63
Tabela 8 – Valores calculados para velocidade de avanço.....	66
Tabela 9 – Valores obtidos do avanço por dente e avanço por revolução.	67
Tabela 10 – Resumo da matriz de experimentos realizados.....	72
Tabela 11 – Resultados quantitativos para a ferramenta P20 no fresamento do corpo de prova de 200 mm.	75
Tabela 12 – Resultados quantitativos para a ferramenta P20 no fresamento do corpo de prova de 400 mm.	76
Tabela 13 – Diferença absoluta e percentual entre $VB_{BM\acute{A}X}$ dos diferentes comprimentos do corpo de prova em função do número de passes para classe P20.	78
Tabela 14 – Resultados quantitativos para a ferramenta P40 no fresamento do corpo de prova de 200 mm.	79
Tabela 15 – Resultados quantitativos para a ferramenta P40 no fresamento do corpo de prova de 400 mm.	80
Tabela 16 – Diferença absoluta e percentual entre $VB_{BM\acute{A}X}$ dos diferentes comprimentos do corpo de prova em função do número de passes para classe P40.	82
Tabela 17 – Diferença absoluta e percentual entre $VB_{BM\acute{A}X}$ dos diferentes comprimentos do corpo de prova em função do número de passes para classe P40.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ANOVA – Análise de variância

APC – Aresta postiça de corte

CBN – Nitreto cúbico de boro

CVD – Deposição química a vapor

ISO – Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization*)

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

NCTM – Número de ciclos termomecânicos

PCBN – Nitreto cúbico de boro policristalino

PCD – Diamante sintético policristalino

PVD – Deposição física a vapor

SAE – Sociedade de Engenheiros Automotivos (*Society of Automotive Engineers*)

LISTA DE SÍMBOLOS

χ_r	– Ângulo de posição
φ_0	– Ângulo de contato fresa-peça
a_e	– Penetração de trabalho
a_f	– Penetração de avanço
a_p	– Profundidade de corte
C	– Centro da fresa
d	– diâmetro da fresa
d_1	– Distância longitudinal entre os cursos da mesa da fresadora
f	– Avanço
f_c	– Avanço de corte
f_e	– Avanço efetivo de corte
f_z	– Avanço por dente
H_0	– Hipótese nula
H_1	– Hipótese alternativa
HB	– Dureza Brinell
HV	– Dureza Vickers
KB	– Largura de cratera
KF	– Distância frontal da cratera
KM	– Distância do centro da cratera
KT	– Profundidade de cratera
L	– Comprimento do corpo de prova
L_1	– Distância do centro da fresa à borda perpendicular a direção de penetração de trabalho
ML	– Comprimento usinado
MP	– Megapixels
n	– número de rotações por minuto
$N_{\text{crítico}}$	– Número crítico do critério de Chauvenet
N_{imp}	– Número de impactos
p	– Número de dados de uma amostra
t	– Tempo cronometrado do deslocamento da mesa da fresadora
T'_1	– Temperatura ao final do período inativo
T_1	– Temperatura ao final do período ativo

t_1 – Tempo ativo
 t_2 – Tempo inativo
 VB_B – Desgaste de flanco médio
 VB_{BMAX} – Desgaste de flanco máximo
 VC – Desgaste de entalhe
 v_c – Velocidade de corte
 v_e – Velocidade efetiva de corte
 v_f – Velocidade de avanço
 VN – Desgaste de entalhe
 w – Direção de penetração de trabalho
 x_1 – medida do desgaste individual
 x_m – média do desgaste
 z – Número de dentes da fresa
 γ_f – Ângulo de saída radial
 γ_o – Ângulo de saída
 γ_p – Ângulo de saída axial
 ΔT – Variação de temperatura
 η – Ângulo da direção efetiva de corte
 λ_s – Ângulo de inclinação
 σ – desvio padrão
 φ – Ângulo da direção de avanço

SÚMARIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivo geral.....	18
1.3 Objetivos específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Processo de usinagem por fresamento	19
2.2 Fresamento Frontal.....	25
2.3 Materiais para ferramenta de corte no fresamento	31
2.4 Desgastes e avarias em ferramentas de corte	40
2.5 Métodos estatísticos	50
2.5.1 Planejamento de experimentos.....	50
2.5.2 Critério de Chauvenet	51
2.5.3 Análise de variância	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1 Descrição geral do trabalho	54
3.2 Materiais e equipamentos	55
3.3 Procedimento experimental	64
3.3.1 Pré-testes	64
3.3.2 Seleção dos parâmetros	65
3.3.3 Ensaios de fresamento	69
3.3.4 Análise no microscópio ótico	73
3.3.5 Análise no MEV	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1 Influência da dimensão da peça na evolução do desgaste para a ferramenta da classe P20	75
4.2 Influência da dimensão da peça na evolução do desgaste para a ferramenta da classe P40	79
4.3 Comparação de desempenho entre as classes P20 e P40	82
4.4 Análise do aspecto geral das ferramentas e mecanismos de desgaste.....	84
5 CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

A compreensão de certos fenômenos que ocorrem nas ferramentas de corte responsáveis pelas avarias e desgastes que reduzem sua vida útil nos processos de usinagem é tema de investigação para pesquisadores e membros da indústria do setor metal mecânico. Dentre as possibilidades de redução de custo em um processo de fabricação por usinagem, surge com grande força a melhoria no desempenho de ferramentas de corte. O custo direto da ferramenta tem mínima representação nos custos de produção de uma peça, quando comparados com matéria-prima, máquinas, mão de obra, entre outros. No entanto, o aumento do tempo de vida das ferramentas traz um grande impacto devido aos custos indiretos associados possibilitando a minimização de estoques e diminuição do tempo de parada de máquinas para troca de ferramentas (SILVA e POLLI, 2010).

O cenário de mercado globalizado e elevada competitividade mobiliza as empresas a buscarem constantes melhorias nos processos de produção visando redução de custos, garantia da qualidade, cumprimento dos prazos de planejamento, manufatura ambientalmente correta e soluções tecnológicas como fatores estratégicos. Para atingir esses objetivos, a ciência e a pesquisa tornam-se aliados para o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte, revestimentos para ferramentas, novos métodos de aplicação, maquinários modernos, ou seja, inovações buscando desempenho confiável minimizando os problemas dos processos de fabricação.

O fresamento é um dos processos de fabricação mais difundidos e utilizados nas indústrias. Além da versatilidade, é conhecido por garantir elevadas taxas de remoção de material uma vez que possui múltiplas arestas cortantes. Boa parte das superfícies não planas e não de revolução de peças mecânicas somente podem ser geradas por fresamento (MACHADO et al., 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010). Este processo caracteriza-se por ser interrompido, ou seja, durante a usinagem a ferramenta de corte passa por períodos ativos (onde há contato da ferramenta com a peça), e por períodos inativos (onde não há contato da ferramenta com a peça). Devido a essa característica interrompida do corte no fresamento, a ferramenta de corte é submetida a flutuações de cargas mecânicas e térmicas, que promovem o aparecimento de uma série de desgastes e avarias nesta. Dentre as avarias, as trincas de origem térmica são sobretudo importantes. O aparecimento

dessas trincas fragiliza mecanicamente a aresta de corte, suscetibilizando-a a outras avarias devido aos choques mecânicos inerentes do processo (MELO, 2001). Tal fenômeno é comum em ferramentas de metal duro e cerâmicas. A característica cíclica de aquecimento e resfriamento produziram efeitos negativos nessas ferramentas (SHINOZAKI, 1962).

Trabalhos sobre o desenvolvimento de desgastes e avarias em ferramentas de metal duro durante corte interrompido são encontrados na literatura, porém em número escasso. Além disso, encontram-se teorias distintas a respeito do desenvolvimento de trincas térmicas nessas ferramentas. Zorev (1963) apud Bathia et al. (1979); Ferraresi (1977); Melo (2001); Melo et al. (2006) relacionam o resfriamento da ferramenta durante o período inativo como fator preponderante para o desenvolvimento de trincas térmicas. Wang et al. (1996) afirmam que a redução de temperatura da ferramenta não é o suficiente para o desenvolvimento das mesmas e relaciona com o número de entradas da ferramenta de corte.

1.1 Justificativa

A área de fabricação sempre busca melhorias no processamento de materiais por meio das modificações originadas de um melhor conhecimento do processo. Certos fenômenos observados nem sempre são os esperados previamente devido aos inúmeros parâmetros que exercem influência de maior ou menor grau sobre um comportamento. No estudo do fresamento, os parâmetros cuja influência normalmente é investigada são: velocidade de corte (v_c); avanço por dente (f_z); profundidade de corte (a_p); penetração de trabalho (a_e); uso de fluidos de corte e métodos de aplicação e o par ferramenta-peça. Esse último parâmetro pode ser dividido em: materiais de ferramenta; geometrias de ferramenta; revestimentos de ferramenta e materiais da peça. Adicionalmente a esses parâmetros existe a influência da geometria da peça caracterizada pelos perfis de entrada e saída da ferramenta de corte e comprimento da peça. Rezende, Santos e Cruz (2015) afirmam que o número de entradas e saídas da ferramenta na peça de trabalho não é o único fator que influencia o comportamento do desgaste da ferramenta. Para o mesmo número de entradas e saídas, a usinagem de um bloco de menor comprimento causou um desgaste maior do que observado no bloco de maior comprimento.

No fresamento muitos fenômenos observados necessitam de uma melhor compreensão teórica. O número de entradas e saídas da ferramenta geram ciclos térmicos que a deixa mais suscetível à fragilização. Adicionalmente as variações de tensões e temperaturas nas ferramentas de corte é assunto que carece de maior investigação.

Diante disso, torna-se necessário conhecer melhor a influência das dimensões da peça para contribuir com a previsibilidade dos processos que seria útil tanto para a comunidade acadêmica quanto para a área fabril.

1.2 Objetivo geral

O objetivo deste estudo é verificar a influência do número de entradas e saídas da ferramenta de corte relacionada com a dimensão da peça no desgaste de ferramentas de metal duro durante o processo de fresamento.

1.3 Objetivos específicos

- Quantificação e avaliação das formas e mecanismos de desgastes nas ferramentas de corte por meio de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Comparar os resultados obtidos pelas diferentes ferramentas de corte e comprimento de peças.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está dividida em subcapítulos, abordando temas relacionados ao processo de fresamento que contribuirão para o esclarecimento do assunto estudado. São os seguintes: Processo de usinagem por fresamento; Fresamento frontal; Materiais para ferramenta de corte no fresamento; Desgastes e avarias em ferramentas de corte.

2.1 Processo de usinagem por fresamento

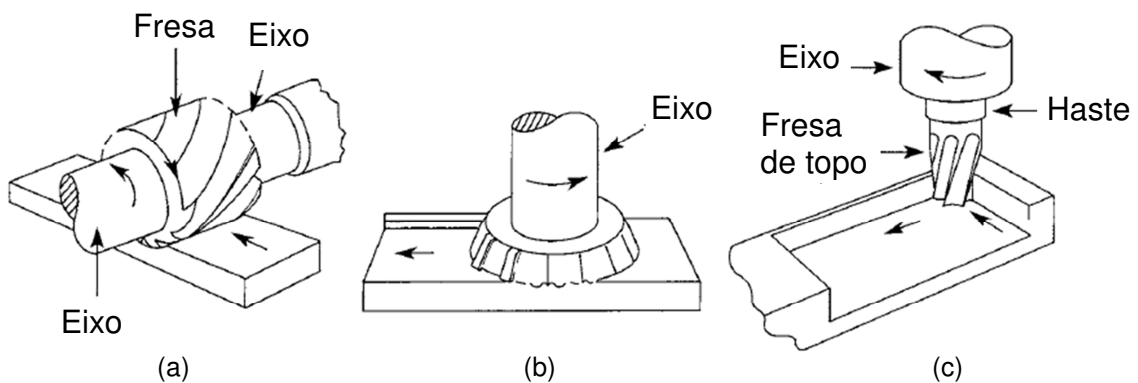
Fresamento é um processo de usinagem no qual a retirada de material da peça se realiza de modo intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta denominada fresa, geralmente com múltiplos dentes de corte, gerando superfícies das mais variadas formas (STEMMER, 1995). O fato da fresa se apresentar em diferentes configurações confere a esta operação um caráter de versatilidade em termos de geometrias possíveis de serem geradas. Grande parte das superfícies não planas e de não revolução de peças mecânicas são geradas somente por fresamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010). Além de todas as aplicações convencionais, o fresamento é uma alternativa para outras operações de usinagem como furos, roscas, cavidades e superfícies que costumavam ser torneadas, furadas ou rosqueadas com macho (SANDVIK COROMANT, 2010).

Esse processo difere dos demais processos de usinagem pelos seguintes fatores: interrupções no corte que ocorrem assim que o dente de corte da fresa engajado deixa a peça de trabalho; o tamanho relativamente pequeno dos cavacos produzidos e a variação de espessura desses (ASM HANDBOOK, 1989).

A operação de fresamento, além da versatilidade, é também reconhecida por assegurar elevadas taxas de remoção de material, já que a fresa possui múltiplas arestas de corte. Nesse grupo de operações, a ferramenta gira enquanto a peça, presa à mesa, é responsável pelos movimentos de avanço longitudinal e transversal. Em alguns casos específicos, a peça pode ficar estática enquanto a ferramenta realiza todos os movimentos (MACHADO et al., 2009). Segundo Kalpakjian e Schmid (2006) dois tipos de fresamento são geralmente considerados para representar todas as outras formas: fresamento tangencial (ou cilíndrico) e fresamento frontal. No fresamento tangencial o eixo da fresa é paralelo à superfície fresada, enquanto no fresamento frontal, o eixo da fresa é geralmente perpendicular

à superfície. O fresamento tangencial é também dividido em dois tipos: convencional (discordante) e concordante. Cada um tem suas vantagens, e a escolha depende de uma série de fatores como o tipo e a condição do equipamento, vida de ferramenta, acabamento superficial e parâmetros de corte. Na Figura 1 mostram-se os tipos básicos de fresas e operações de fresamento.

Figura 1 – Tipos básicos de fresas e operações de fresamento. (a) Fresamento tangencial; (b) fresamento frontal; (c) fresamento de topo.

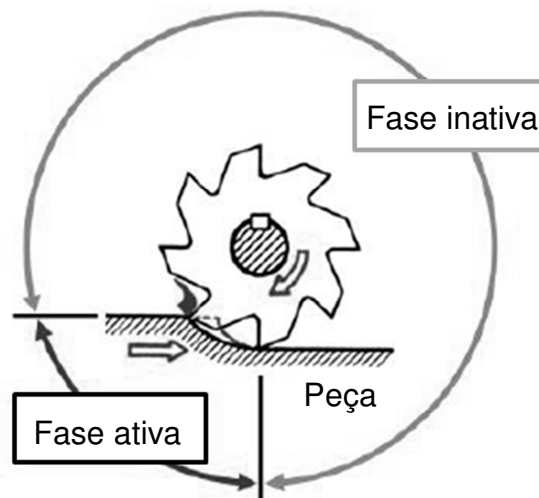


Fonte: KALPAKIJAN e SCHMID, 2006.

Silva (2010) apresentou algumas características importantes que o processo de fresamento deve possuir para uma aplicabilidade satisfatória e produção de peças com qualidade desejada. Dentre elas, é citada a elevada rigidez, ou seja, o conjunto deve possuir rigidez o suficiente para suportar choques mecânicos inerentes ao processo de fresamento, devido à característica de fase ativa e fase inativa percorrida por cada aresta. Na Figura 2 observam-se essas duas fases percorridas pela fresa durante o processo de fresamento tangencial discordante.

Resultados satisfatórios no fresamento possuem forte dependência da rigidez do conjunto ferramenta-peça e seu arranjo. A deflexão da ferramenta e a trepidação como resultado de folgas, por exemplo, causam desgaste em excesso além de quebra da ferramenta, dano à peça, redução da exatidão dimensional e um acabamento superficial inaceitável. Arranjos rígidos reduzem ou eliminam essas condições adversas, aumentando a produção e minimizam os custos de produção.

Figura 2 – Fase ativa e inativa no processo de fresamento tangencial discordante.



Fonte: LIMA, 2011.

Além de gerar cargas mecânicas durante o corte, a característica interrompida do fresamento faz surgir um fenômeno físico interessante e prejudicial ao mesmo tempo. Com as flutuações de temperatura durante o processo de usinagem (devido à alternância entre as fases ativa e inativa), as ferramentas de corte podem sofrer desgastes intensos motivados pela geração de trincas de origem térmica. Essas trincas apresentam-se perpendiculares à aresta de corte, fragilizando-a e tornando-a susceptível à avarias devido aos efeitos dos impactos mecânicos do processo. São mais frequentes em ferramentas de metal duro e de cermets e praticamente não se manifestam em ferramentas de aço rápido (MELO, 2001).

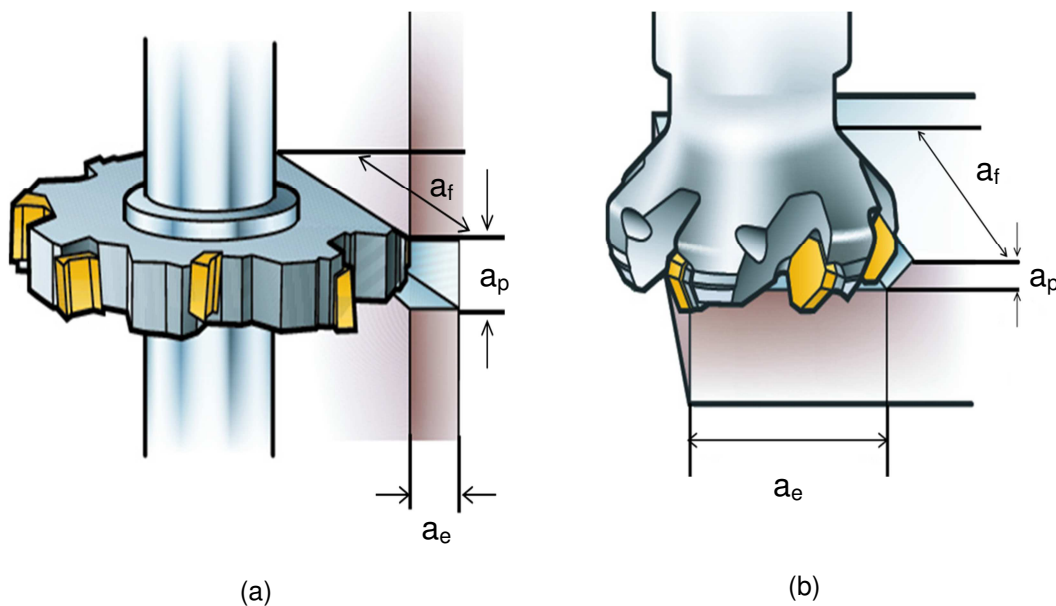
A seguir são apresentadas algumas definições importantes do processo de fresamento e parâmetros de trabalho baseados em Machado et al. (2009), Diniz, Marcondes e Coppini (2010) e Sandvik Coromant (2010).

- **Penetração de trabalho ou largura de corte (a_e)** – é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço. À medida que a_e cresce, aumenta o ângulo de contato fresa-peça (φ_0) em cada volta da ferramenta e, assim, aumenta a temperatura da ferramenta. Portanto, seu aumento tende a causar uma forte queda da vida da ferramenta.

- **Profundidade de corte ou largura de usinagem (a_p)** – é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho.
- **Penetração de avanço (a_f)** – é a grandeza de penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção do avanço.

Na Figura 3 são mostradas as grandezas de corte citadas para o fresamento tangencial e frontal.

Figura 3 – Penetração de trabalho (a_e), profundidade de corte (a_p) e penetração de avanço (a_f).



(a) Fresamento tangencial e (b) Fresamento frontal.

Fonte: SANDVIK COROMANT, 2010 (adaptado).

- **Velocidade de corte (v_c)** – é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte. É calculada pela Equação 1:

$$v_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

v_c = velocidade de corte (m/min);

d = diâmetro da fresa (mm);

n = número de rotações por minutos (rpm).

- **Velocidade de avanço (v_f)** – é a velocidade instantânea de ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço. É calculada pela Equação 2:

$$v_f = f \times n \quad (2)$$

Onde:

v_f = velocidade de avanço (mm/min);

f = avanço (mm/rev);

n = número de rotações por minuto (rpm).

- **Velocidade efetiva de corte (v_e)** – é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo de corte. É calculada vetorialmente pela Equação 3:

$$\vec{v_e} = \vec{v_c} + \vec{v_f} \quad (3)$$

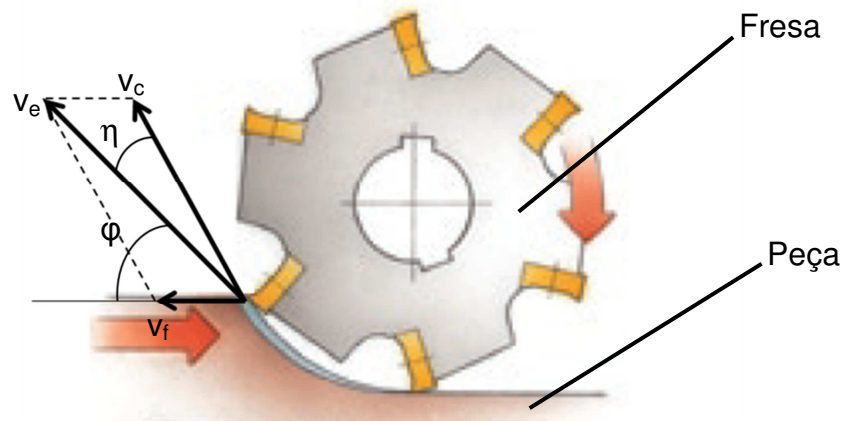
Onde:

v_e = velocidade efetiva de corte (m/min).

- **Ângulo da direção de avanço (ϕ)** – formado entre a direção de avanço e a direção de corte.
- **Ângulo da direção efetiva de corte (η)** – formado entre a direção efetiva de corte e a direção de corte.

Na Figura 4 são representadas as velocidades e os ângulos da direção de avanço e da direção efetiva de corte.

Figura 4 – Representação da velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_f), velocidade efetiva (v_e), ângulo da direção de avanço (ϕ) e ângulo da direção efetiva de corte (η) no fresamento tangencial discordante.



Fonte: SANDVIK COROMANT, 2010 (adaptado).

- **Avanço (f)** – é o percurso de avanço em cada volta da fresa (mm/rev). No caso de ferramentas que possuem mais de um dente, como a fresa, distingue-se ainda o avanço por dente (f_z) que por sua vez é ainda decomposto no avanço de corte (f_c) e no avanço efetivo de corte (f_e).
- **Avanço por dente (f_z)** – representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção de avanço da ferramenta (correspondente à geração de duas superfícies consecutivas em usinagem). É válida a relação expressa pela Equação 4:

$$f = f_z \times z \quad (4)$$

Onde:

f_z = avanço por dente (mm/dente);

z = número de dentes.

- **Avanço de corte (f_c)** – representa a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho. É representada pela Equação 5:

$$f_c = f_z \times \sin \phi \quad (5)$$

Onde:

f_c = avanço de corte (mm/dente).

- **Avanço efetivo de corte (f_e)** – representa a distância entre duas superfícies consecutivas medida na direção perpendicular à direção efetiva de corte no plano de trabalho. É representada pela Equação 6:

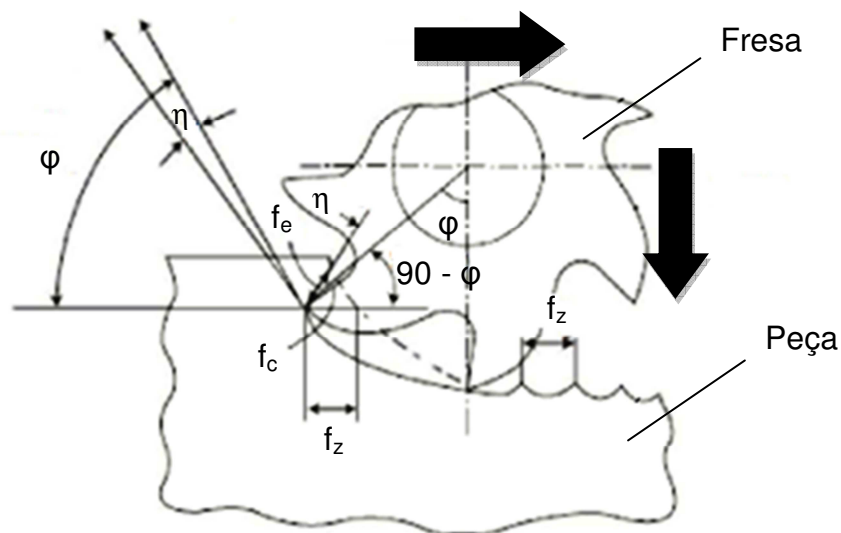
$$f_e = f_z \times \sin(\varphi - \eta) \quad (6)$$

Onde:

f_e = avanço efetivo de corte (mm/dente).

Na Figura 5 mostram-se o avanço por dente, o avanço de corte e o avanço efetivo de corte no fresamento tangencial discordante.

Figura 5 – Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e) no fresamento tangencial discordante.



Fonte: MACHADO et. al, 2009 (adaptado).

2.2 Fresamento Frontal

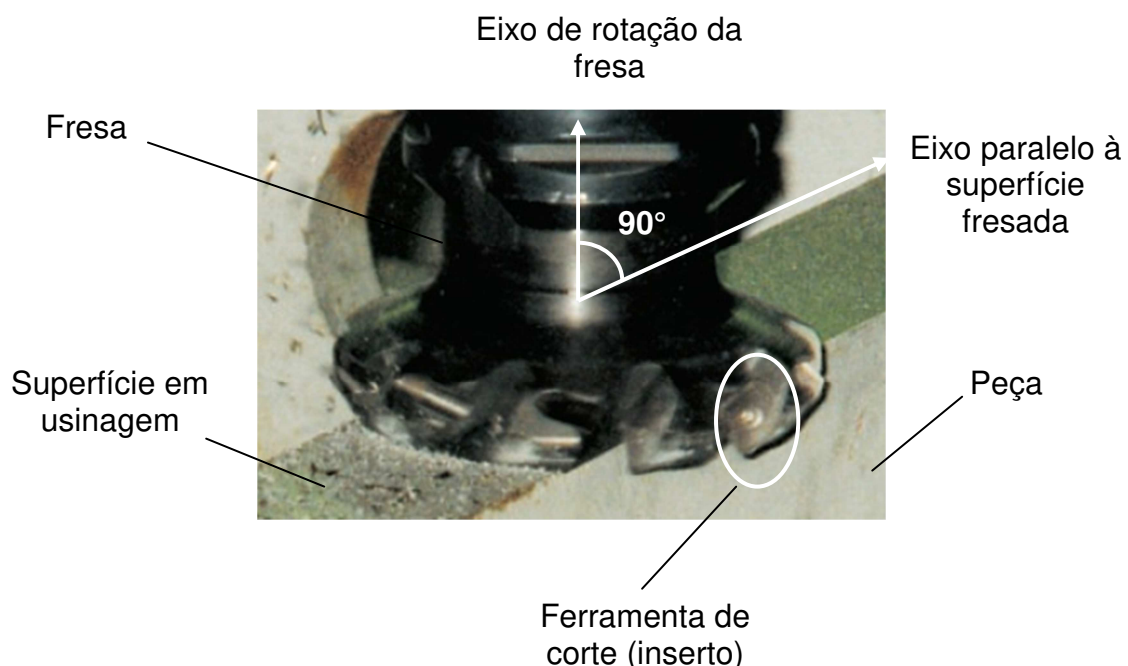
O método de fresamento utilizado no trabalho é o fresamento frontal e, portanto, será dada ênfase a esse tipo. De acordo com Metals Handbook (1989), o fresamento frontal é usado para usinagem de superfícies planas por meio da fresa que apresenta dentes em sua superfície frontal e são conduzidos por eixos

posicionados perpendicularmente à superfície fresada. Os cortes no fresamento frontal são profundos radialmente e estreitos axialmente diferentemente do que ocorre no fresamento tangencial. Portanto, o fresamento frontal remove uma dada quantidade de metal com menor potência do que o fresamento tangencial. Outras vantagens comparativas são:

- Maior rigidez da fresa por ser anexada diretamente no eixo da árvore da máquina.
- Áreas maiores podem ser fresadas com pequena protrusão do eixo.
- Maior flexibilidade no tamanho da peça de trabalho.
- Forças de corte são mais uniformemente distribuídas.
- Menor tempo requerido para troca de ferramentas.

As limitações comparativas estão relacionadas à restrição da usinagem de superfícies planas e ao aumento de esforços na direção perpendicular à de avanço na medida em que a largura do corte aumenta em relação ao diâmetro da fresa devido ao aumento dos dentes engajados na retirada de material. Na Figura 6 apresenta-se o processo de fresamento frontal e suas características.

Figura 6 – Processo de fresamento frontal e suas características.

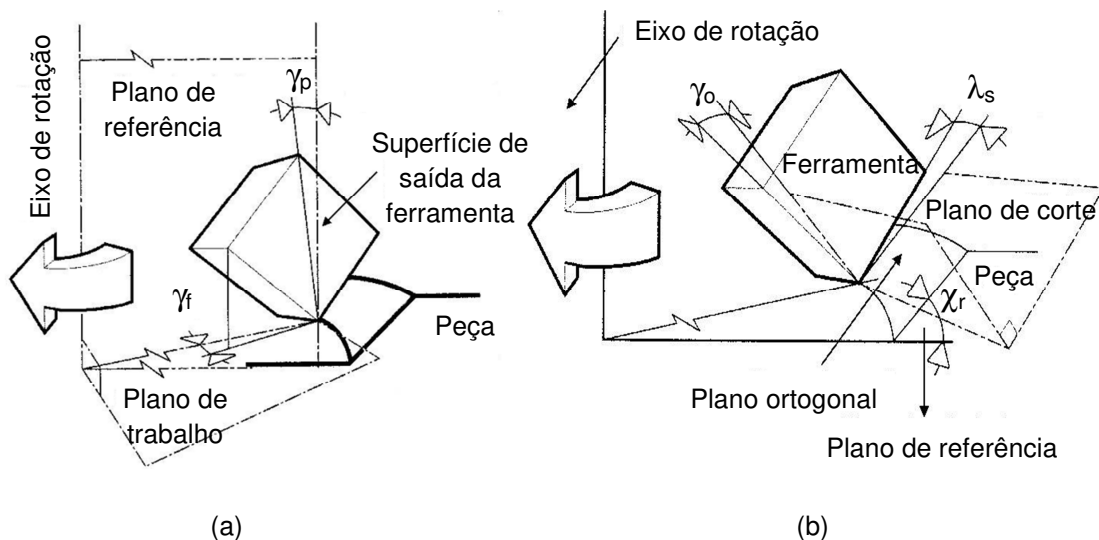


Fonte: SANDVIK COROMANT, 2005 (adaptado).

A geometria de um fresamento frontal com fresas de facear envolve vários ângulos para definir a posição do inserto, num espaço tridimensional. Os principais ângulos estão representados na Figura 7 e são:

- Ângulo de posição (χ_r).
- Ângulo de saída (γ_o).
- Ângulo de saída radial (γ_f).
- Ângulo de saída axial (γ_p).
- Ângulo de inclinação (λ_s).

Figura 7 – Geometria dos principais ângulos no fresamento frontal.



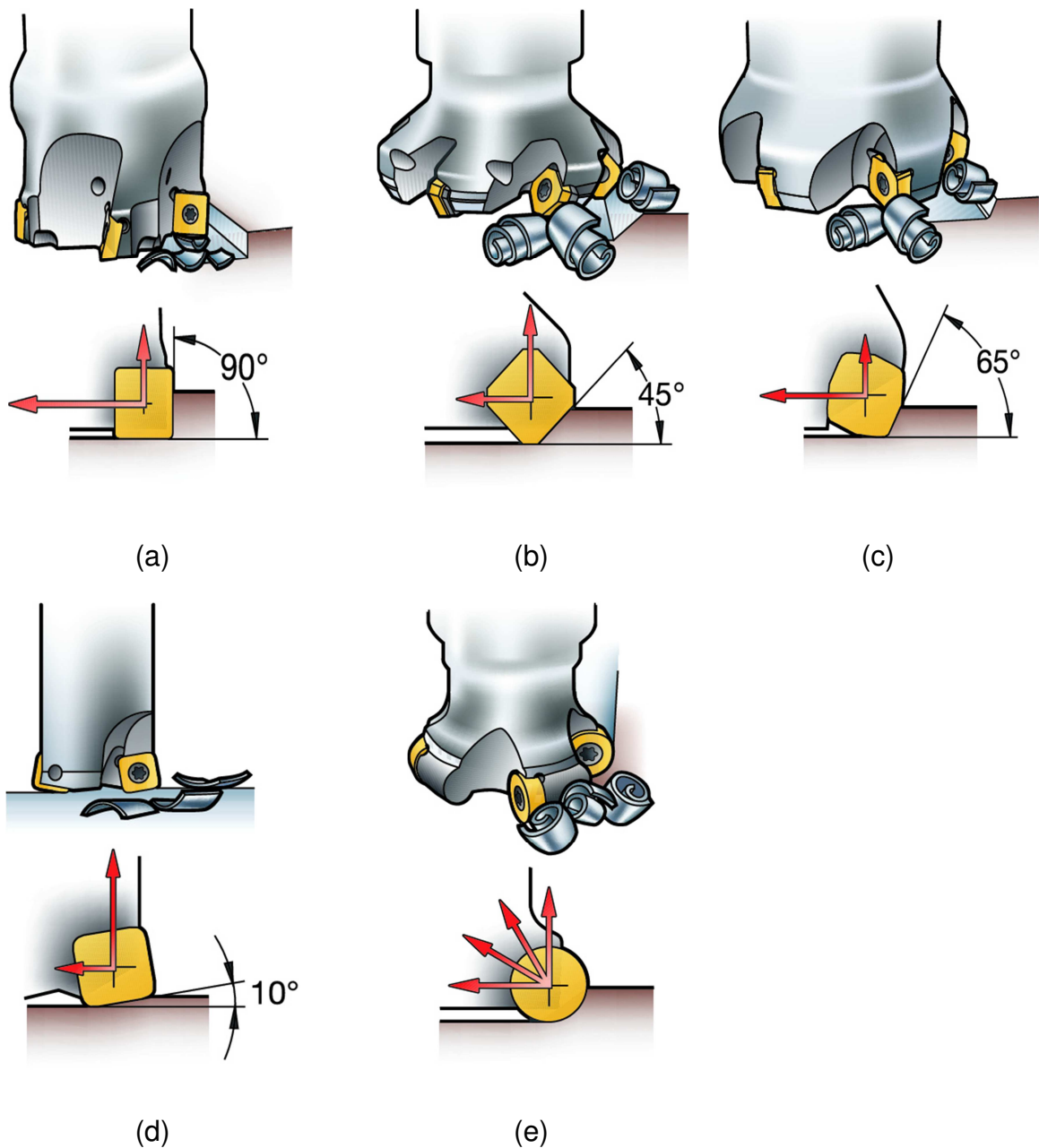
(a) Ângulos de saída radial(γ_f) e axial(γ_p) e (b) Ângulos de saída (γ_o), de inclinação (λ_s) e de posição (χ_r)

Fonte: SANDVIK COROMANT, (1994).

Diniz, Marcondes e Coppini (2010) fazem considerações importantes em termos da geometria dos dentes da fresa. Com relação ao ângulo de posição (χ_r), normalmente só se utiliza fresa com $\chi_r = 90^\circ$ quando é necessário fresar um encaixe com este ângulo. Caso contrário, é recomendável usar uma fresa com ângulo de posição menor devido às seguintes razões: saída dos cavacos se torna mais difícil; maior tendência a vibrações e maior fragilidade das pontas das arestas cortantes.

Os ângulos de posição comuns em fresas de facear são 75° , 60° e 45° . Porém outras geometrias foram desenvolvidas para atender aplicações específicas como fresas com ângulo de posição de 10° e fresas com ferramentas redondas. Na Figura 8 são apresentados os tipos de fresas e os respectivos ângulos de posição

Figura 8 – Fresa a (a) 90° , (b) 45° , (c) 60° a 75° , (d) 10° e (e) ferramentas redondas.



Fonte: SANDVIK COROMANT, 2010 (adaptado).

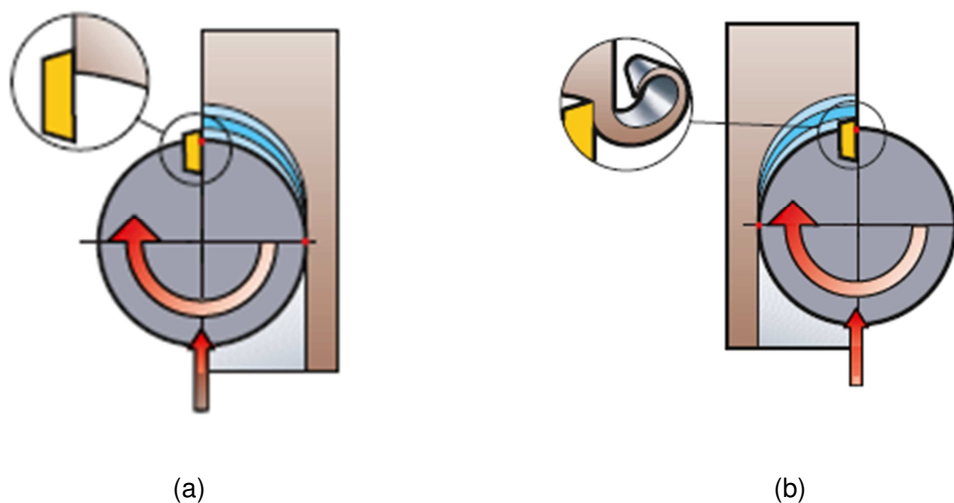
Sandvik Coromant (2010) afirma que a espessura de cavacos, forças de corte e vida útil da ferramenta são grandezas afetadas pelo ângulo de posição. Ademais apresenta as seguintes ideias:

- Redução do ângulo de posição em arestas retas diminui a espessura de cavacos para uma determinada faixa de avanço. Este efeito de afinamento dos cavacos espalha a quantidade de material sobre uma grande parte da aresta de corte.
- Ângulos de posição pequenos oferecem uma posição mais gradual no corte, reduzindo a pressão radial e protegendo a aresta de corte.
- Forças axiais mais altas na diminuição dos ângulos de posição aumentarão a pressão na peça.

2.2.1 Entradas e saídas da ferramenta de corte

Chu e Dornfeld (2005) definem os termos entrada e saída da ferramenta de corte. Saída refere especificamente à aresta da ferramenta de corte movendo para fora da peça de trabalho. Entrada refere especificamente à aresta da ferramenta de corte movendo em direção à peça de trabalho removendo material desta. Um passe de usinagem equivale a uma entrada e uma saída. Na Figura 9 estão representadas essas definições.

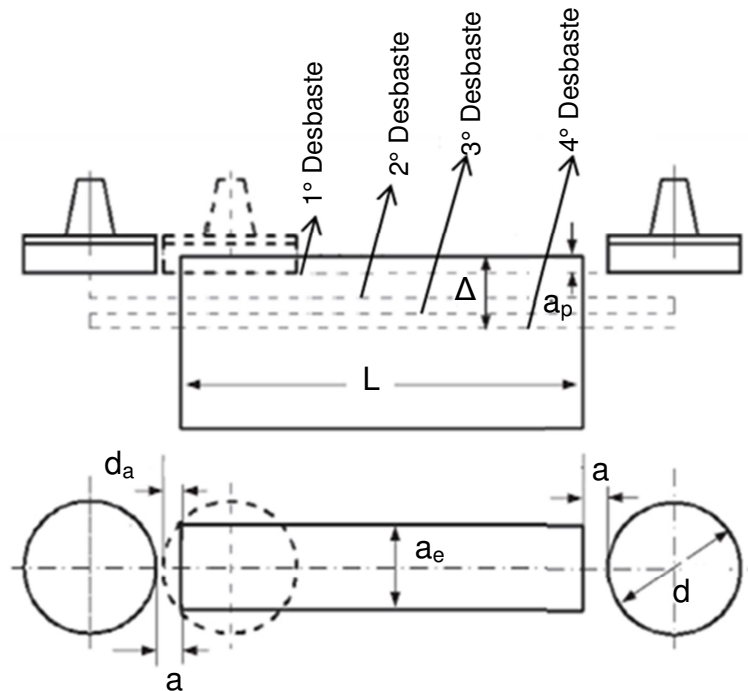
Figura 9 – Representação da (a) entrada e (b) saída da ferramenta de corte no processo de fresamento.



Fonte: SANDVIK COROMANT, 2010 (adaptado).

Em seus estudos de otimização de parâmetros em fresamento frontal, Li et al. (2016) afirmam que dependendo dos requisitos do processo, a operação de fresamento pode ser executada em múltiplos passes ou em passe único enfatizando as vantagens econômicas em termos de consumo de energia e custo do produto final para o processo em múltiplos passes. Na Figura 10 é mostrada uma operação de fresamento em múltiplos passes.

Figura 10 – Operação de fresamento em múltiplos passes



Fonte: LI et al, 2016 .

Chen, Li e Zeng (2006) transformaram os passes que a ferramenta executa durante um corte em números de impactos sofridos pela ferramenta através de formulações matemáticas. Sob específicas condições de corte, quer a operação seja fresamento discordante ou concordante, a fresa inicia o corte quando ela atinge a posição (ϕ_{ent}) onde a distância (L_1) do seu centro (C) à borda perpendicular à direção de penetração de trabalho (w) é dada pela Equação 7 e mostrada na Figura 11:

$$L_1 = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2} - a_e\right)^2} \quad (7)$$

Onde:

d = diâmetro da fresa (mm);

a_e = penetração de trabalho (mm).

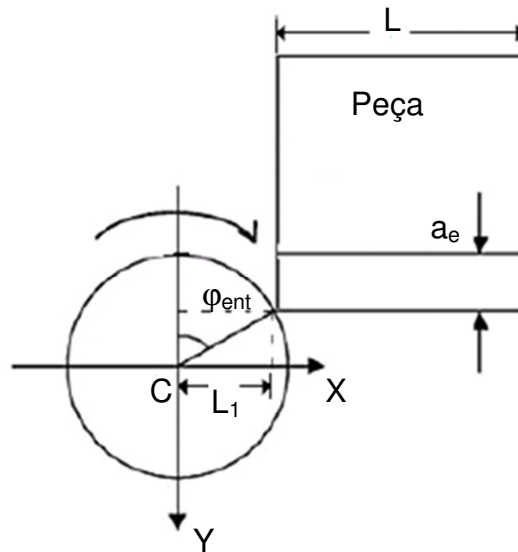
A fresa termina o corte quando seu centro atinge a posição onde a distância até a borda perpendicular da peça de trabalho é L_1 . Portanto, o comprimento usinado (ML) em um passe é dado pela Equação 8:

$$ML = L + L_1 \quad (8)$$

O número de impactos (N_{imp}) que uma ferramenta está sujeita em um único passe é dado pela Equação 9:

$$N_{imp} = \frac{ML}{f_z} \quad (9)$$

Figura 11 – Representação da posição de início de corte



Fonte: CHEN, LI e ZENG, 2006 (adaptado).

2.3 Materiais para ferramenta de corte no fresamento

De acordo com Trent e Wright (2000), as pressões de mudança tecnológica e competição econômica impuseram critérios de maior severidade para as ferramentas de corte. Para atingi-los, novos materiais têm sido desenvolvidos e testados ao longo do tempo. Os materiais que permaneceram apresentam comportamento satisfatório em termos de vida da ferramenta, taxa de remoção de material,

superfície final produzida, bom desempenho em aplicações variadas e os custos das ferramentas feitas com esses materiais.

Para a seleção criteriosa do material da ferramenta, uma série de fatores deve ser ponderada, dentre os quais podem ser mencionados os seguintes: material a ser usinado; processo de usinagem; condição da máquina operatriz; forma e dimensões da ferramenta; custo do material da ferramenta; condições de usinagem e condições de operação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010). Não necessariamente reunidas em um só material, Machado et al. 2009 listam as principais propriedades desejáveis em uma ferramenta de corte:

- Alta dureza.
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura.
- Alta resistência ao desgaste abrasivo.
- Alta resistência à compressão.
- Alta resistência ao cisalhamento.
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas.
- Alta resistência ao choque térmico.
- Alta resistência ao impacto.
- Ser inerte quimicamente.

A operação de corte interrompido requer materiais que componham ferramentas com suficiente tenacidade para suportar os choques e impactos inerentes ao processo de usinagem. Como, em geral, dureza e tenacidade são duas propriedades distintas, o balanço dessas propriedades nos materiais de ferramentas de corte se tornou um desafio para os fabricantes.

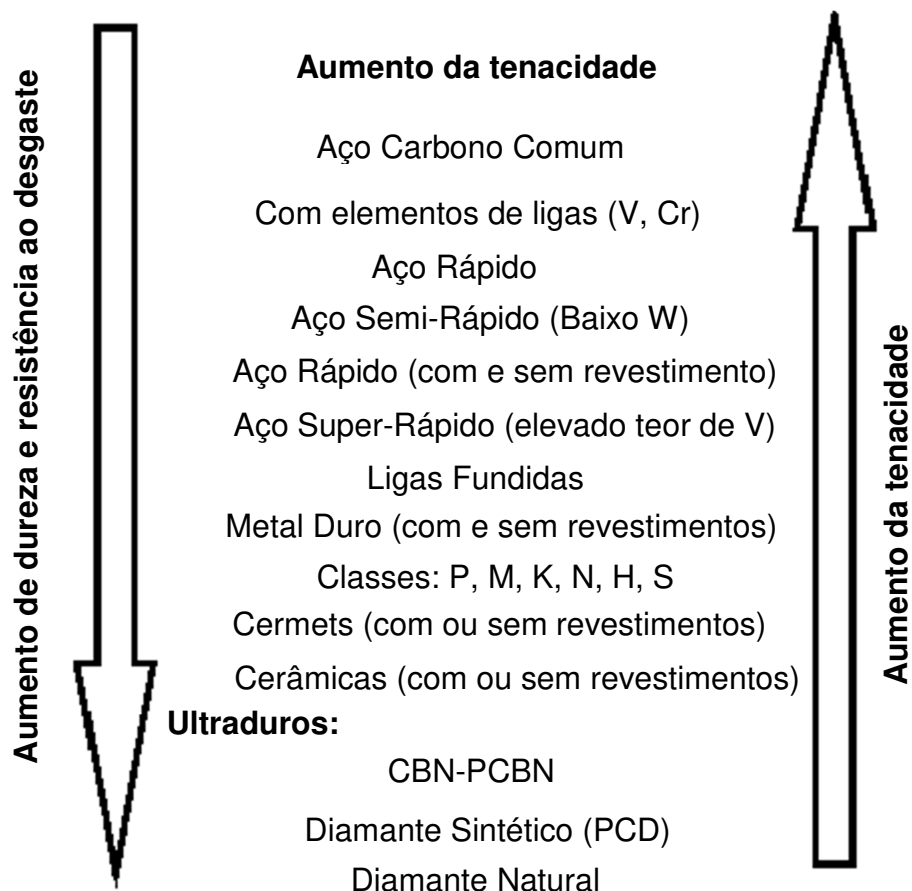
Ferraresi (1977) classifica os materiais para ferramentas utilizando como critério a ordem cronológica do seu desenvolvimento e seus característicos químicos. Eles podem ser agrupados da seguinte maneira:

- Aços-carbono, sem elementos de liga ou com baixos teores de liga.
- Aços rápidos.
- Ligas fundidas.

- Metal duro.
- Materiais cerâmicos.

Outros materiais que poderiam ser considerados são o diamante, os cermets e o PCBN. Na Figura 12 observam-se os materiais para ferramentas de corte.

Figura 12 – Quadro demonstrativo dos materiais para ferramentas.



Fonte: SANTOS e SALES, 2007.

Os grupos de materiais para ferramentas que, até o momento, constituem os mais importantes são os aços rápidos e o metal duro. O metal duro se aplica na maioria das operações de usinagem desde ligas metálicas conhecidas ou aços temperados além de grande variedade de substâncias não metálicas. Desenvolvimentos tecnológicos possibilitaram a sua fabricação em grande número e variedade de formas e dimensões, assim como a criação de novas classes tornando, de fato, o metal duro o material de usinagem mais importante.

2.3.1 Ferramentas de Metal Duro

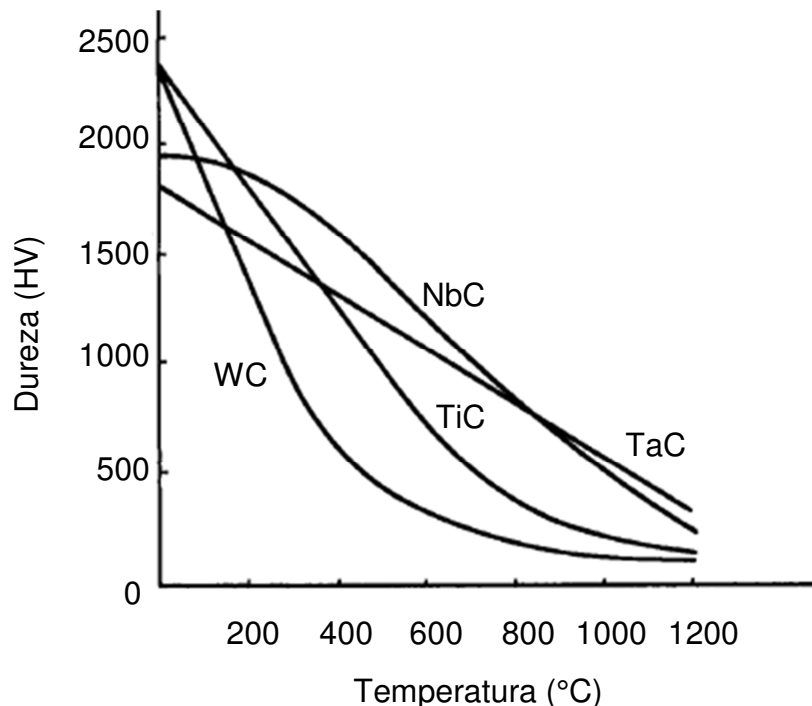
Neste trabalho as ferramentas de corte utilizadas são de metal duro com diferentes tenacidades. Freire (1977) define o metal duro como um produto da metalurgia do pó, designado também usualmente como carboneto de tungstênio sinterizado, ou ligas duras. Em todos os tipos de metal duro, a substância predominante é o tungstênio, na forma de um carboneto, de dureza muito elevada, alta resistência ao desgaste e apreciável resistência ao calor. Junto do carboneto de tungstênio está sempre o cobalto, cuja ação inicial é atuar como aglomerante das partículas de carboneto de tungstênio, sendo, além disso, o elemento responsável pela tenacidade que em maior ou menor grau, deve também caracterizar o carboneto. Trent e Wright (2000) afirmam que o carboneto de tungstênio (WC) pode ser combinado com pequenas porcentagens de metais do grupo ferro (ferro, níquel ou cobalto) também na forma de pós-finos, porém o cobalto é o material aglomerante mais eficiente. Marcondes (2008) diz que o WC determina a resistência ao desgaste e o metal ligante Co determina a tenacidade.

De acordo com Machado et al. (2009) o material originalmente desenvolvido na Alemanha continha WC + Co e se mostrou muito eficiente na usinagem de ferros fundidos cinzentos, mas com baixa resistência ao desgaste na superfície de saída usinando aços. Para solucionar esse problema adicionou-se TiC, TaC e/ou NbC aos WC + Co, verificando-se significativa redução no problema de craterização durante a usinagem dos aços. As razões para essa redução do desgaste na superfície de saída são:

- Os carbonetos adicionados têm maiores durezas que o WC, portanto, apresentam maior resistência ao desgaste abrasivo.
- A solubilidade dos carbonetos adicionados é muito menor que o WC, o que inibe a difusão, um dos mecanismos de desgaste mais importantes a altas temperaturas, característica da superfície de saída.
- A estabilidade química dos carbonetos adicionados é maior que a do WC, o que implica maiores dificuldades de dissolução e de difusão desses elementos.

Na Figura 13 são mostrados os valores de dureza Vickers de quatro dos mais importantes carbonetos medidos em diferentes temperaturas.

Figura 13 – Dureza Vickers (HV) em diferentes temperaturas para o WC, TiC, TaC e NbC.



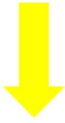
Fonte: TRENT e WRIGHT, 2000 (adaptado).

A Norma ISO 513 (2004) apresenta a classificação de grupos de ferramentas. A letra de designação da classe é sempre acompanhada de um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta: quanto maior o número, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste. A classificação é mostrada na Tabela 1.

A classe P é constituída de metais duros de elevado teor de TiC + TaC, que lhes confere uma elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. É indicado para a usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos, formando uma grande área de contato com a superfície de saída da ferramenta. A classe K foi o primeiro tipo de metal duro a ser desenvolvido. O metal duro desta classe é composto de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto. Não são resistentes ao mecanismo de desgaste de cratera e, assim, são indicados para a usinagem de materiais frágeis que formam cavacos curtos que não atiram muito com a superfície

de saída da ferramenta. A classe M é um grupo com propriedades intermediárias, sendo destinado a ferramentas com aplicações múltiplas. O principal material usualmente usinado por ferramentas desta classe é o aço inoxidável. As classes N, S e H foram criadas depois e possuem respectivamente composição similar às classes K, M e P. Verifica-se, portanto, uma diferença de abordagem na classificação ISO baseada na aplicação do material e não mais na composição química (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010).

Tabela 1 – Classificação dos metais duros segundo a Norma ISO 513.

Principais classes			Classes de aplicação	
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros	a b
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P05 P20 P15 P30 P25 P40 P35 P50 P45	 
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M05 M20 M15 M30 M25 M40 M35	 
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K05 K20 K15 K30 K25 K40 K35	 
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N05 N20 N15 N30 N25	 
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e	S01 S10 S05 S20 S15 S30 S25	 
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros	H01 H10 H05 H20 H15 H30 H25	 
a - Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.				
b - Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.				

Fonte: ISO 513, 2004 (adaptado).

Com o objetivo de melhor explorar as vantagens de alguns materiais de elevada dureza e estabilidade química, desenvolveram-se os metais duros revestidos. Metal

duro revestido apresenta-se atualmente em 80-90% de todas as pastilhas para ferramentas de corte (SANDVIK, 2016). Estes se compõem de uma base de metal duro relativamente tenaz, sobre a qual se aplica uma ou mais camadas finas, duras, resistentes à abrasão e de fina granulometria, de um material composto de carbonetos (por exemplo, TiC, HfC, ZrC), de nitretos (TiN, HfN, ZrN), de carbonitretos (TiCN) ou de óxidos (Al_2O_3). Estes revestimentos permitem um aumento substancial da vida das ferramentas. Em condições adequadas este aumento corresponde a um múltiplo de tempo de vida das ferramentas de metal duro convencional (STEMMER, 1993). O sucesso dos revestimentos duros nos substratos de ferramentas de corte resulta da combinação das propriedades físicas e mecânicas das camadas. Sob uma perspectiva funcional, estabilidade química, dureza à quente e boa adesão ao substrato são essenciais (PRENGEL; PFOUTS; SANTHANAM, 1998). Astakhov e Davim (2008) afirmam que carbonetos são excelentes substratos para todos os revestimentos como o TiN, TiAlN, TiCN, revestimentos sólidos lubrificantes e revestimentos multicamadas. Os revestimentos apresentam as seguintes vantagens:

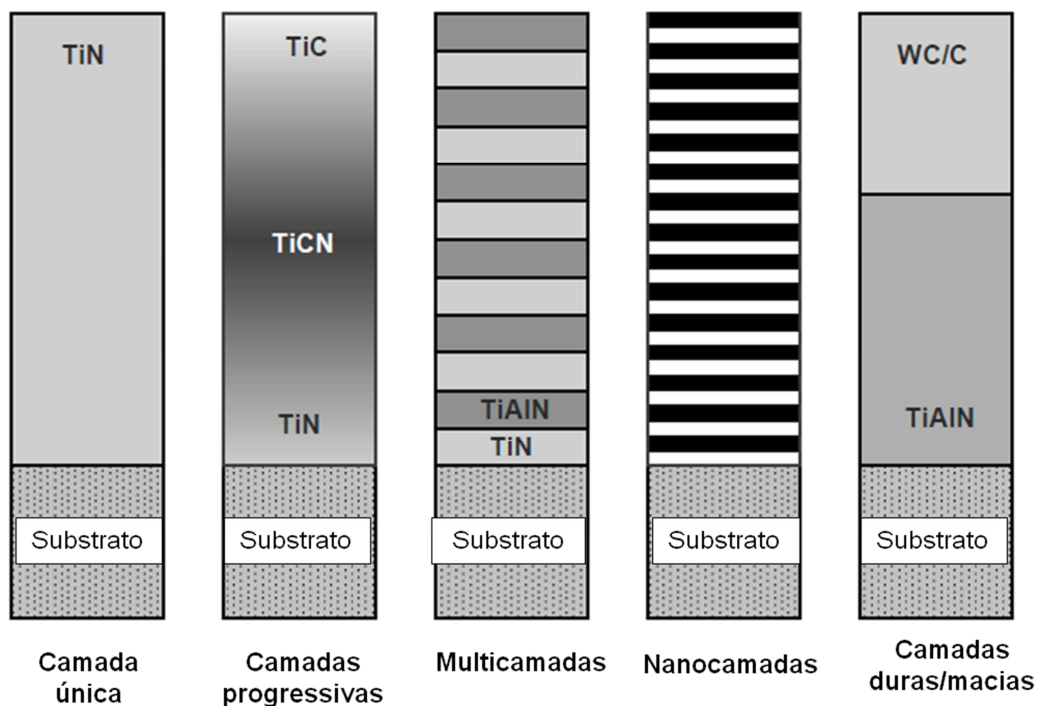
- Aumento da dureza superficial.
- Aumento da resistência (desgaste abrasivo e adesivo, desgaste de cratera e flanco).
- Redução do coeficiente de atrito facilitando o deslizamento de cavacos sobre a superfície da ferramenta, reduzindo força de corte, prevenindo adesão, reduzindo o calor gerado.
- Redução da porção de energia térmica que flui para dentro da ferramenta.
- Aumenta da resistência à corrosão e oxidação.
- Melhora da qualidade superficial de peças acabadas.

Revestimentos comuns para ferramentas de metal duro aplicadas em simples ou multicamadas são mostradas na Figura 14.

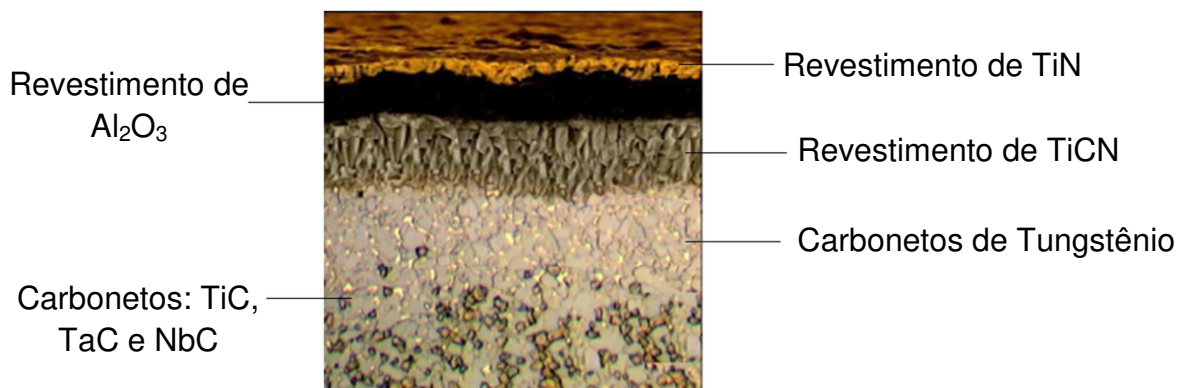
O revestimento pode ser uma única camada de TiC, ou, mais comum, ser de triplo revestimento de TiC, TiCN e TiN ; TiC, Al_2O_3 e TiN. O TiC é um revestimento que é muito utilizado como a primeira camada, pois este garante uma coesão muito boa com o substrato. Além disso, o TiC é um dos revestimentos mais duros atualmente

utilizados, sua dureza é de 3000 HV o que garante alta resistência ao desgaste. Já a alumina (Al_2O_3) tem várias vantagens, as principais são a inércia química, a dureza e, portanto, resistência ao desgaste, e um fato ocorrente é a redução de sua condutividade térmica com o aumento da temperatura. Isto garante uma barreira térmica interessante para a superfície da ferramenta. O TiN se apresenta, normalmente como a camada externa, por proporcionar baixos coeficientes de atrito entre a ferramenta e o cavaco, isto na usinagem de metais ferrosos. Este material garante menores comprimentos de contato cavaco-ferramenta devido a menor tendência de adesão dos ferrosos neste material. Outro revestimento que vem sendo usado é o TiAlN ou (TiAl)N que é um nitreto à base de Ti e Al. Este revestimento tem se mostrado excelente na usinagem de ferros fundidos. A espessura total das camadas revestidas pode variar de 4 a 12 μm e camadas muito espessas podem fragilizar a aresta (SANTOS e SALES, 2008). Na Figura 15 é mostrada a microestrutura do metal duro com substrato de carboneto de tungstênio e a matriz metálica de cobalto, além de revestimentos aplicados na superfície da ferramenta.

Figura 14 – Revestimentos modernos para ferramentas de metal duro.



Fonte: ASTAKHOV e DAVIM, 2008 (adaptado).

Figura 15 – Microestrutura do metal duro e seus revestimentos.

Fonte: SOUZA, 2011.

Marcondes (2008) afirma que o revestimento pode ser obtido tanto pelo processo CVD (deposição química a vapor) quanto pelo processo PVD (deposição física a vapor). Na Tabela 2 é apresentada uma comparação entre as ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD.

Tabela 2 – Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD.

	CVD – Deposição química a vapor	PVD – Deposição física a vapor
Temperatura de revestimento	Aproximadamente 1000 °C	Aproximadamente 500 °C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
Espessura do revestimento	Até 12 μm	Até 4 μm
Camadas	Multicamadas TiC – TiN, TiN – TiCN – TiN, TiC – Al_2O_3	TiN, TiCN, TiAlN
Principais aplicações	Torneamento e mandrilamento	Fresamento, roscamento e furação
Vantagens	Maior resistência ao desgaste Maior resistência à craterização Grande vida da ferramenta	Substitui ferramentas sem revestimento: com mesma tenacidade, mesma configuração de aresta e mesma precisão Reduz APC Maior vida de ferramenta

Fonte: MACHADO et al., 2009 (adaptado).

De acordo com Sandvik (2000), a antiga desvantagem do processo CVD, isto é, a elevada temperatura durante o processo que poderia prejudicar o metal duro em termos de tenacidade, já foi superado e a cobertura pode ser aplicada com alta sofisticação, permitindo um controle total das propriedades da classe. Há também novos processos, como, por exemplo, o CVD por plasma em temperatura ambiente, que pode ser usado para aplicação de coberturas a baixas temperaturas. O substrato de metal duro não ficou à margem desses desenvolvimentos tão positivos. Sendo mais bem protegido e menos afetado pelo processo de cobertura ele pode ser mais duro, o que, por sua vez, torna a pastilha menos propensa à deformação plástica e, conseqüentemente, mais apropriada para trabalhar sem refrigeração.

2.4 Desgastes e avarias em ferramentas de corte

Segundo Machado et al. (2009), por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofrerá um processo de desgaste que levará à sua substituição. Portanto, em um processo de usinagem, existem duas causas principais para a substituição da ferramenta de corte, encerrando sua vida:

- Avarias (trinca, lascamento ou quebra).
- Desgastes ou deformações excessivas de modo que comprometa a usinagem dentro das especificações.

Na prática, as avarias são mais comuns no corte interrompido (fresamento) devido aos choques térmicos e mecânicos envolvidos neste processo. Já nos cortes contínuos a ocorrência é mais rara, exceto para condições de corte que excedam as recomendadas. O desgaste, por sua vez, é observado tanto nos processos de corte contínuo quanto nos de corte interrompido.

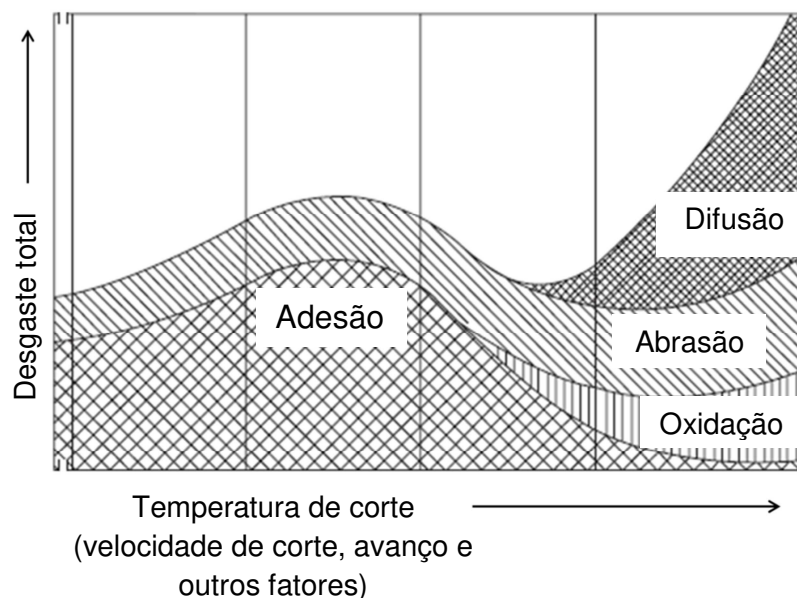
Desgaste de ferramenta de corte é resultado de carga, atrito e alta temperatura entre a aresta de corte e a peça de trabalho. Diferentes mecanismos de desgaste podem ocorrer durante a usinagem de metais: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste difusivo, oxidação e fadiga (SANDVIK COROMANT, 1994, *apud* GU et al., 1999):

- **Desgaste adesivo:** também conhecido como desgaste *attrition*, ocorre principalmente em baixas temperaturas. O mecanismo leva à formação da aresta postiça de corte (APC). É um processo dinâmico, com sucessivas camadas de cavaco sendo soldadas e tornando parte da aresta de corte. A APC pode ser destacada, mas será formada novamente. Quando atinge um tamanho instável se quebra em pequenas partículas ou fratura. Em temperaturas de corte elevadas, as condições para ocorrência desse fenômeno são bem reduzidas (GU et al., 1999). Conforme a APC se forma e desaparece, pequenas seções do material da ferramenta são também destacadas (WRIGHT e BAGCHI, 1981).
- **Desgaste abrasivo:** envolve a remoção do material da ferramenta por ação de inclusões de material duro no cavaco (WRIGHT e BAGCHI, 1981). A habilidade da aresta de corte em resistir ao desgaste abrasivo está relacionada com sua dureza (GU et al., 1999).
- **Desgaste difusivo:** envolve o transporte de átomos do material da ferramenta através do movimento do cavaco e é predominantemente controlado pela solubilidade da fase do carboneto no material do cavaco (WRIGHT e BAGCHI, 1981). É mais afetado por fatores químicos durante o processo de corte. As propriedades químicas do material da ferramenta e afinidade com o material da peça de trabalho determinará o desenvolvimento desse mecanismo de desgaste (GU et al., 1999).
- **Oxidação:** representa um dos mecanismos de desgaste por reação química, o qual ocorre quando espécies no material da ferramenta ou peça de trabalho reagem com o oxigênio atmosférico. É comum ser observado em regiões onde o contato peça-ferramenta é exposto à atmosfera e é facilmente detectável pela descoloração do material da ferramenta na zona afetada. Oxidação pode ser observada como um severo desgaste de entalhe. O crescimento do entalhe pode levar a falhas catastróficas pela quebra da ferramenta. Algumas vezes fragmentos do desgaste produzidos pela oxidação resultam no aumento do desgaste abrasivo (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006, *apud* OLORTEGUI-YUME e KWON, 2007).

- **Fadiga:** é frequentemente uma combinação termomecânica. Flutuações de temperatura e o carregamento e descarregamento de forças de corte podem levar a trincas e quebras de arestas de corte. Ação de corte intermitente induz aquecimento e resfriamento repetitivos bem como choques na aresta de corte pelo engajamento. Fadigas mecânicas puras podem também ocorrer quando as forças de corte são bem maiores que a resistência mecânica da aresta de corte (GU et al., 1999).

Na Figura 16 são apresentados os mecanismos de desgaste em função da temperatura.

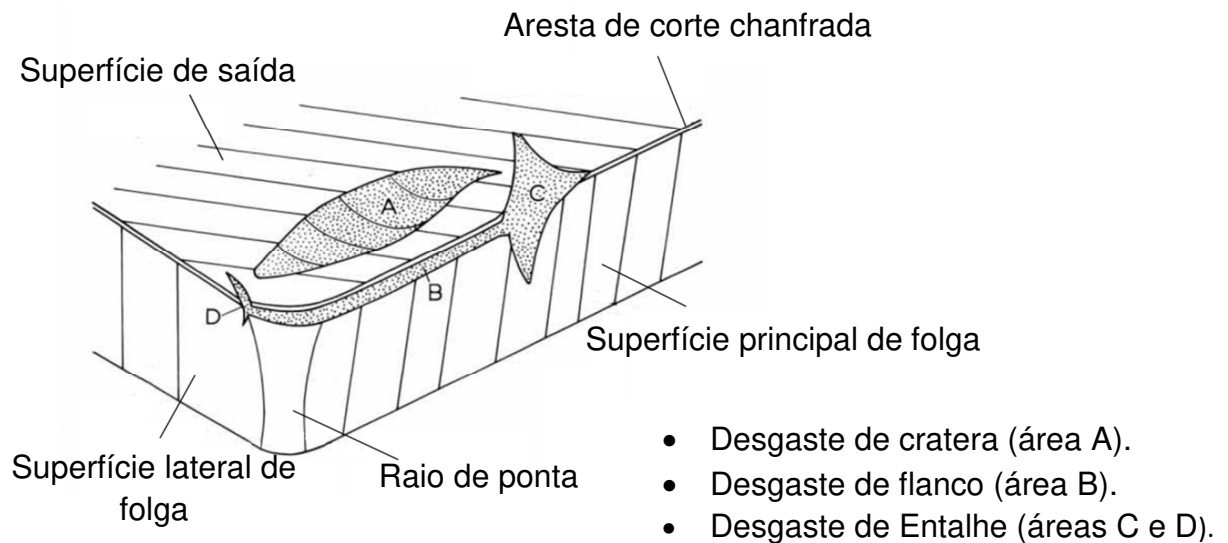
Figura 16 – Mecanismos de desgaste de corte em função da temperatura.



Fonte: VIEREGGE, 1970, *apud* MACHADO et al., 2009 (adaptado).

Os desgastes também são classificados em formas. As formas mais comuns e a localização estão representadas na Figura 17 e são:

Figura 17 – Principais áreas e formas de desgaste de uma ferramenta de corte.



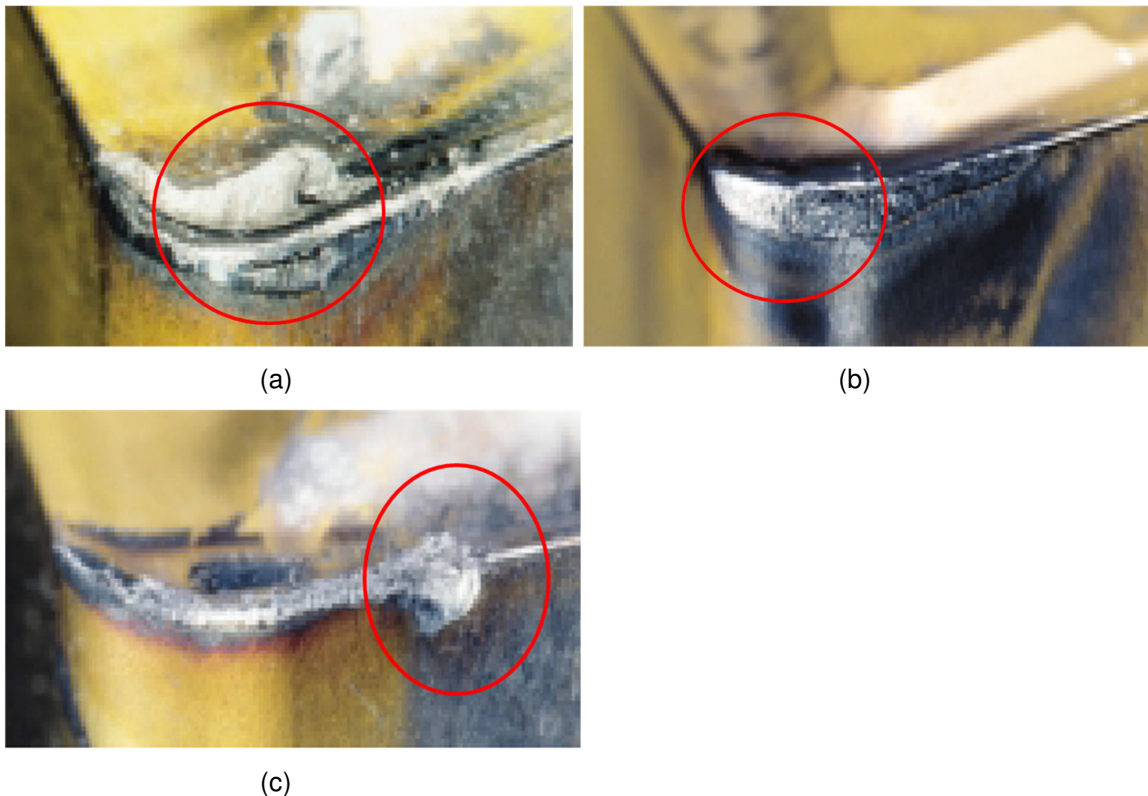
Fonte: TRENT e DEARNLEY, 1982 (adaptado).

- **Desgaste de cratera (área A):** desgaste de cratera ocorre na superfície da saída da ferramenta a uma pequena distância da aresta de corte enquanto materiais dúcteis são usinados como os aços e suas ligas. Esse desgaste reduz a resistência da ferramenta e aumenta a temperatura de corte e o atrito entre a superfície de saída e o cavaco (EL-HOFY, 2013).
- **Desgaste de flanco (área B):** ocorre na superfície de folga da ferramenta causado pelo contato entre ferramenta e peça. É o mais comum dos tipos de desgaste. É incentivado, em geral, pelo aumento da velocidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010). Maior o desgaste de flanco, mais força de corte é necessária para o processo já que os insertos vão se tornando cada vez menos afiados assim que o desgaste vai se desenvolvendo (BJURKA, 2011). É principalmente causado pela ação abrasiva de inclusões duras na peça de trabalho, fragmentos de APC ou partículas de material da ferramenta removidas por adesão (EL-HOFY, 2013).
- **Desgaste de entalhe (áreas C e D):** ocorre localmente na região da aresta de corte principal onde há o contato com a superfície da peça de trabalho. É causado por camadas duras de superfície e rebarbas endurecidas (EL-HOFY, 2013). Esse tipo de desgaste muda a forma da ponta da ferramenta e, com

isso, influencia no acabamento da superfície usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010).

Na Figura 18 estão representadas as formas de desgaste citadas em uma ferramenta de corte.

Figura 18 – Formas de desgaste em uma ferramenta de corte.



(a) Desgaste de cratera, (b) Desgaste de flanco e (c) Desgaste de entalhe.

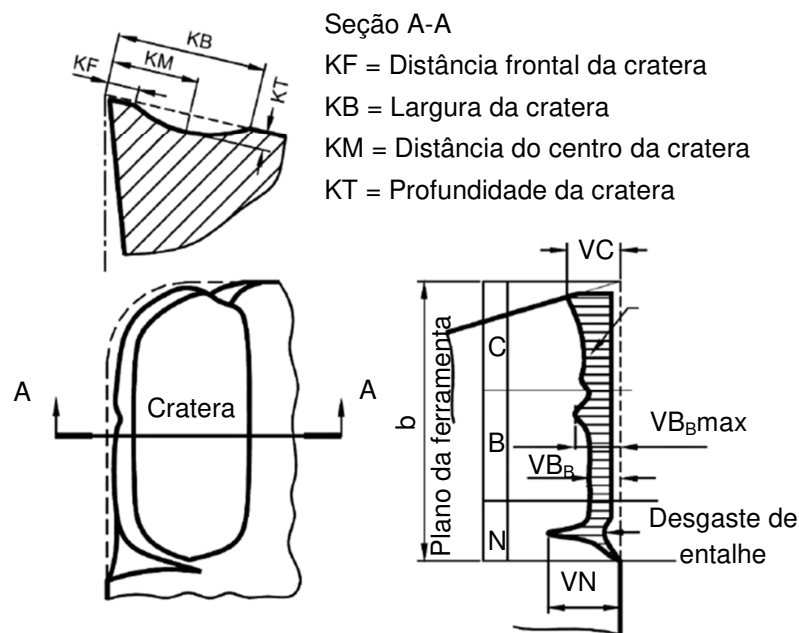
Fonte: SANDVIK COROMANT, 2010 (adaptado).

A Norma ISO 3685 (1977) mostra os parâmetros utilizados para quantificar essas formas de desgaste. Os principais parâmetros são K_T , que diz respeito à profundidade de cratera, VB_B , para o desgaste de flanco médio, $VB_{B\text{MÁX}}$, para o desgaste de flanco máximo e VC e VN relativo ao desgaste de entalhe conforme a Figura 19. Em termos de valores, as ferramentas de metal duro devem ser substituídas ou reafiadas quando:

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3 \text{ mm}$.

- Desgaste de flanco máximo, $VB_{BM\acute{A}X} = 0,6 \text{ mm}$, no caso de desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco.
- Profundidade de cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$.
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02\text{mm}$.
- Falha catastrófica.

Figura 19 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.



Fonte: ISO 3685, 1977.

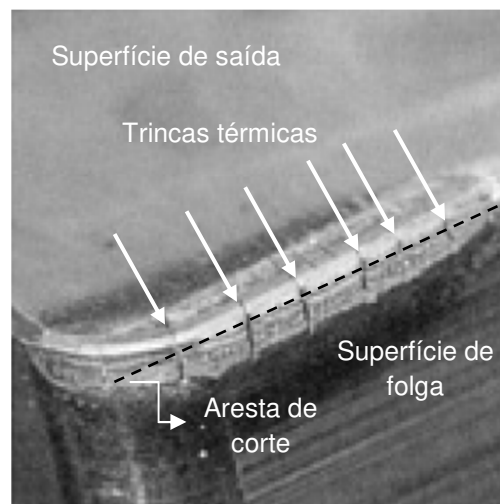
Na subseção seguinte será dado maior enfoque às avarias de origem térmica (trincas) no corte interrompido.

2.4.1 Trincas de origem térmica no processo de fresamento

Ferramentas de metal duro exibem às vezes uma série de trincas perpendiculares à aresta de corte quando aplicadas em operações de corte interrompido como o fresamento. Essas trincas térmicas são causadas pela contração e expansão alternadas da superfície da ferramenta quando aquecidas durante o corte e resfriadas fora do corte. As trincas iniciam na superfície de saída e difundem para a aresta e para a superfície de folga da ferramenta. (ASM HANDBOOK, 1989). Essas

trincas são descritas como trincas térmicas, sulcos em forma de pente ou marcas térmicas (BATHIA; PANDEY; SHAN, 1979). Na Figura 20 são mostradas as trincas térmicas em um inserto de metal duro.

Figura 20 – Trincas térmicas em uma ferramenta de metal duro.



Fonte: ASM HANDBOOK, 1989.

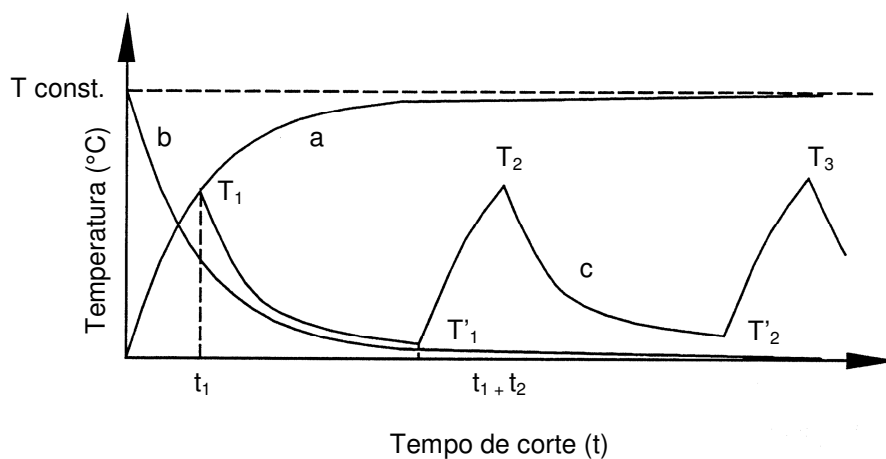
Shinozaki (1962) afirma que antigamente acreditava-se que a operação de fresamento era preferível ao torneamento do ponto de vista de vida de ferramenta, pois a aresta de corte seria mais efetivamente resfriada no corte interrompido do que no contínuo. Entretanto ferramentas cerâmicas ou de metal duro, que são particularmente pouco resistentes sob tensões térmicas, apareceram como novos materiais para ferramentas e as condições de corte tornaram-se mais severas. Então a característica cíclica de aquecimento e resfriamento veio a exercer efeitos negativos na vida da ferramenta. Resultados experimentais de Roubik (1952) apud Shinozaki (1962) mostraram que, em alguns casos de fresamento frontal, a vida da ferramenta é maior na operação a seco do que com fluidos de corte.

Na Figura 21 está representada, entre outros, a variação da temperatura de corte ao longo do processo de fresamento.

A curva “a” representa o aquecimento da aresta de corte durante um corte contínuo, onde a temperatura tende a se estabilizar em um valor constante salvo quando os efeitos do desgaste começam a interferir no processo. A curva “b” representa o resfriamento contínuo da aresta desde a temperatura constante atingida até o valor

da temperatura ambiente. No corte interrompido representado pela letra “c”, existe um tempo ativo t_1 onde a aresta se aquece até atingir a temperatura T_1 . Nesse momento inicia-se o tempo inativo t_2 , quando a aresta começa a se resfriar até atingir a temperatura T'_1 , ao final do tempo $t_1 + t_2$. Zorev (1963) apud Bathia, Pandey e Shan (1979) estabeleceu que o período ativo durante o ciclo tem uma grande influência na vida da ferramenta de metal duro. Ele inferiu que devido ao rápido resfriamento da superfície da ferramenta durante a interrupção do corte, tensões de compressão são desenvolvidas na superfície que leva à formação das trincas térmicas. Mais tarde, testes realizados por Zorev (1963) mostraram que um grande intervalo inativo ou de não corte acelera a formação dessas trincas. Recomenda-se o aquecimento das ferramentas durante o período inativo através de vapor de ar quente ou queimador de gás com o objetivo de reduzir a diferença de temperaturas. Ferraresi (1977) apresenta uma explicação para o fenômeno através da Figura 22 onde está representada a distribuição de temperatura e tensões na pastilha de metal duro de uma fresa.

Figura 21 – Variação da temperatura de corte ao longo do processo de fresamento.

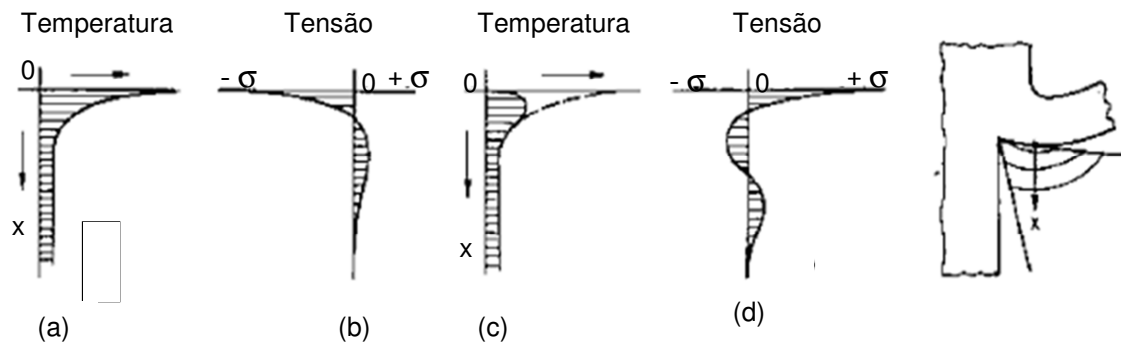


Fonte: PALMAI, 1987.

A Figura 22 (a) apresenta a curva de distribuição da temperatura em relação à profundidade x , a partir do ponto de contato cavaco-ferramenta. A camada superficial, a uma temperatura bastante alta, se dilata. Porém, as camadas subsequentes, a temperaturas inferiores, terão uma dilatação bem menor. Como consequência, tais camadas impedirão o processamento de uma dilatação muito

maior na camada superficial. Desta forma originam-se na camada superficial (camada de contato cavaco-ferramenta) tensões de compressão (Figura 22 b).

Figura 22 – Distribuição da temperatura e das tensões na ferramenta de metal duro de uma fresa.



Fonte: FERRARESI, 1977.

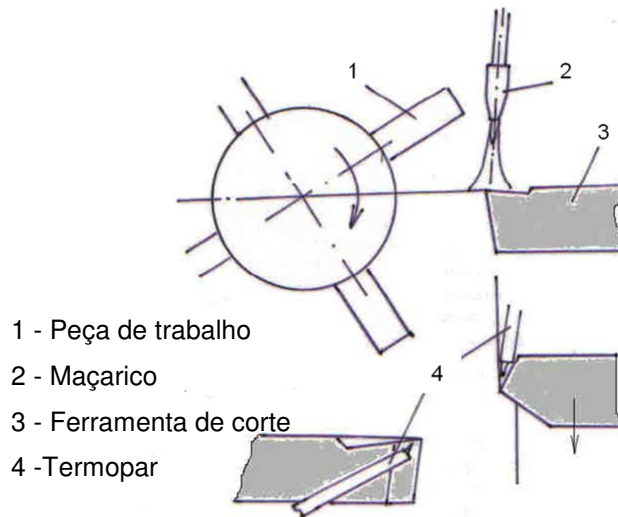
Em consequência disto haverá, a determinada distância x da superfície de contato, tensões de tração. Em tempo seguinte, com a variação da temperatura de corte, isto é, com o resfriamento da camada de contato, essa camada estará submetida à tração, enquanto que as camadas subseqüentes passarão a ser solicitadas por compressão (Figuras 22 (c) e (d)). Esta variação de tensões repete-se com a variação de temperatura proveniente do corte interrompido ou do acesso irregular do refrigerante do corte. Após um determinado número de variações de solicitações na pastilha de metal duro, aparecem trincas superficiais.

Wang, Sahay e Rajurkar (1996) apresentaram uma nova interpretação do surgimento dessas trincas térmicas. Segundo cálculos e medidas dos autores, quando o dente da fresa é desengajado e inicia-se o período inativo, a temperatura não reduz a níveis suficientes que induzem tensões na superfície de saída. As tensões se desenvolvem ciclicamente com crescimento do gradiente de temperatura em cada entrada da fresa na peça de trabalho. Portanto, os ciclos de entrada e saída são os responsáveis pelas trincas e fadigas térmicas.

Vasilko (2007) por sua vez demonstra a influência do controle da temperatura da ferramenta durante o corte interrompido na sua durabilidade. Testes foram feitos durante o corte de uma peça de trabalho com e sem aquecimento da aresta de corte

da ferramenta de metal duro P20 utilizando maçarico. Na Figura 23 é apresentado como foi realizado o controle de temperatura da aresta cortante.

Figura 23 – Controle da temperatura da aresta de corte.

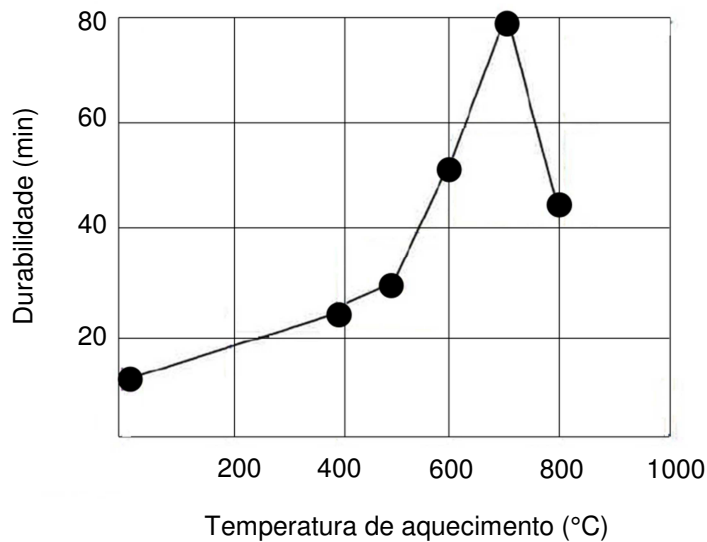


Fonte: VASILKO, 2007.

Utilizando o critério de fim de vida de ferramenta como $VB_B = 0,4$ mm, a durabilidade da ferramenta pôde ser determinada em função da temperatura de aquecimento conforme Figura 24.

Portanto, a durabilidade aumenta durante o aquecimento da ferramenta de corte em cerca de oito vezes quando comparadas a durabilidade com o corte a 0 e 700 °C. Isso prova que a temperatura é decisiva no desgaste da ferramenta durante o corte interrompido. Melo et al. (2006) reforçam esse ponto de vista ao afirmarem que as variações na temperatura ($\Delta T = T_1 - T'_1$) causam variações de cargas na superfície da ferramenta e são, pois, um fator determinante para surgimento de trincas. Além desse fator, deve-se levar em consideração o NCTM (número de ciclos termomecânicos) que corresponde ao número de períodos ativos e inativos de corte.

Figura 24 – Durabilidade da ferramenta durante o corte interrompido em função da temperatura de aquecimento.



Fonte: VASILKO, 2007 (adaptado).

2.5 Métodos estatísticos

O presente trabalho consistiu na realização de experimentos e a análise de resultados foi feita com o auxílio de ferramentas estatísticas. O planejamento de experimentos, a análise de variância e o critério de Chauvenet foram as técnicas abordadas.

2.5.1 Planejamento de experimentos

Segundo Montgomery e Runger (2016), técnicas de planejamento de experimentos, com base estatística, são particularmente úteis no mundo da engenharia, a fim de resolver muitos problemas importantes: a descoberta de novos fenômenos básicos que podem levar a novos produtos e a comercialização de nova tecnologia, incluindo o desenvolvimento de novos produtos, novos processos e a melhoria de produtos e processos existentes. A maioria dos processos existentes pode ser descrita em termos de muitas variáveis controláveis. Usando experimentos planejados, engenheiros podem determinar qual subconjunto das variáveis tem a maior influência no desempenho do processo. Algumas aplicações típicas de experimentos planejados estatisticamente em projeto de engenharia incluem:

- Avaliação e comparação de configurações básicas de projeto;
- Avaliação de materiais diferentes;
- Seleção de parâmetros de projeto de modo que o produto trabalhe bem sob uma ampla variedade de condições de campo;
- Determinação dos parâmetros-chave do projeto de produtos que afetem o desempenho do produto.

O uso de planejamento de experimentos no projeto de engenharia pode resultar em produtos que sejam mais fáceis de fabricar, em produtos que tenham melhor desempenho no campo e melhor confiabilidade do que seus competidores, e em produtos que possam ser projetados, desenvolvidos e produzidos em menor tempo. Além disso, permitem a eficiência e economia no processo experimental, e o uso de métodos estatísticos no exame de dados resulta na objetividade científica quando da tirada de conclusões.

2.5.2 Critério de Chauvenet

Supondo-se que medidas sejam tomadas de uma quantidade e que o resultado segue uma distribuição normal, para a eliminação de dados discrepantes, usualmente é aplicado um teste, conhecido como critério de Chauvenet para eliminar dados ou medidas discrepantes (NIELSEN, 2001).

O critério de Chauvenet especifica que uma medida pode ser considerada discrepante e pode ser rejeitada se a probabilidade de obter um desvio particular da média é menor que $\frac{1}{2p}$ conforme Equação 10.

$$\frac{x_1 - x_m}{\sigma} < N_{\text{crítico}} \quad (10)$$

Onde:

x_1 = medida do desgaste individual;

x_m = média do desgaste;

σ = desvio padrão;

Na Tabela 3 são apresentados os valores da razão do desvio para o desvio padrão de vários valores de p segundo o critério de Chauvenet.

Tabela 3 – Critério de Chauvenet para rejeição de dados discrepantes.

Número de dados	$N_{\text{crítico}}$
2	1,15
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,8
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Fonte: GULARTE, 2005 (adaptado).

2.5.3 Análise de variância

A Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica utilizada para testar a igualdade entre médias de vários grupos (MONTGOMERY e RUNGER, 2016). Paiva (2004) afirma que quando dois níveis de um fator geram respostas médias estatisticamente iguais, significa que o fator não influencia a resposta, ou seja, hipótese nula (H_0). Quando, ao contrário, a resposta média de um nível específico é estatisticamente diferente daquela obtida nos outros níveis o fator é significativo (H_1). No caso, a dimensão do corpo de prova seria um fator e diferentes dimensões seriam níveis do fator.

O teste utilizado pela ANOVA para verificar a igualdade entre as médias baseia-se na relação existente entre a variação dentro de um tratamento (*Within*) e a variação entre tratamentos (*Between*) (MONTGOMERY e RUNGER, 2016).

Segundo Balestrassi (2003), a variação dentro de um tratamento origina-se das replicações. Calculando a média das replicações obtém-se a média dentro do tratamento. Quanto mais as replicações diferirem desta média, maior será a variação dentro deste tratamento. Dividindo a variação entre tratamentos pela variação dentro de um tratamento chega-se à Estatística de Teste F, que, quando comparada com um valor F crítico, definido segundo o nível de significância e o número de graus de liberdade, possibilita a aceitação ou rejeição da hipótese nula, acerca da igualdade entre as médias dos níveis dos fatores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

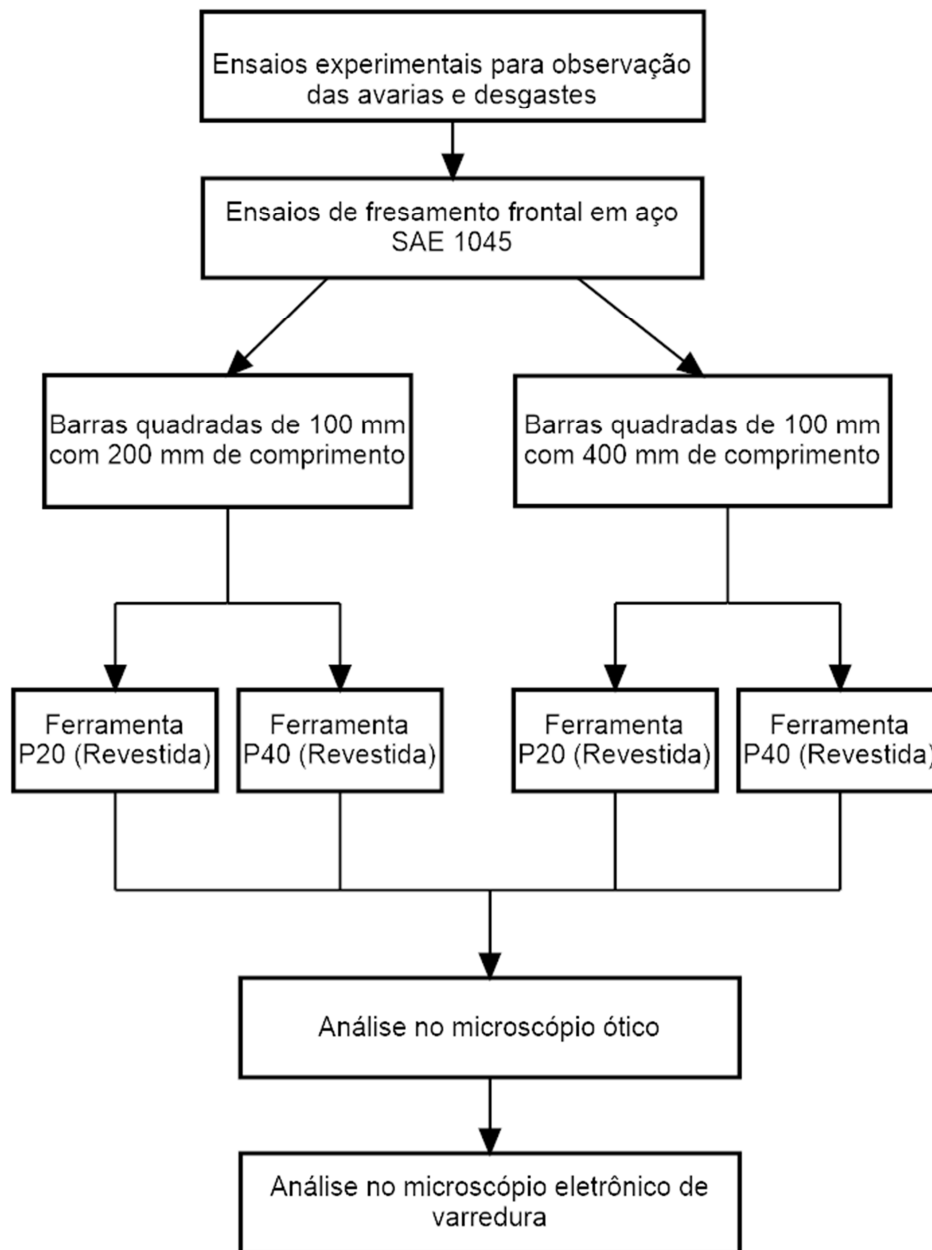
O presente capítulo está dividido em três partes: Descrição geral do trabalho; Materiais e equipamentos; Procedimento experimental.

3.1 Descrição geral do trabalho

Este trabalho tem o propósito de investigar a influência das dimensões da peça na evolução do desgaste das ferramentas de corte no processo de fresamento. Ensaios de fresamento frontal e análises em microscopia ótica foram realizados respectivamente nos laboratórios de Usinagem e de Materiais, Tribologia e Superfície (Lamatsu) localizados no CEFET-MG Câmpus II. As análises utilizando microscopia eletrônica de varredura foram feitas no laboratório de Caracterização do CEFET-MG Câmpus I.

Ferramentas de metal duro foram montadas na fresadora disponível no laboratório de Usinagem e após definição dos parâmetros de corte, esses foram mantidos constantes com a finalidade de averiguar apenas a influência das dimensões da peça no desgaste da ferramenta. Após uma quantidade definida de passes da ferramenta sobre a peça, elas foram removidas e as arestas correspondentes analisadas. Posteriormente, as ferramentas foram recolocadas na fresa, mantendo a posição da aresta cortante e se iniciou um novo ciclo de corte. Os dados foram coletados, avaliados e dispostos graficamente a fim de comparar o desempenho das ferramentas e evolução do desgaste. Na Figura 25 é apresentado um fluxograma que resume a sequência dos procedimentos utilizados nessa pesquisa.

Figura 25 – Fluxograma da sequência dos procedimentos.



Fonte: Próprio autor.

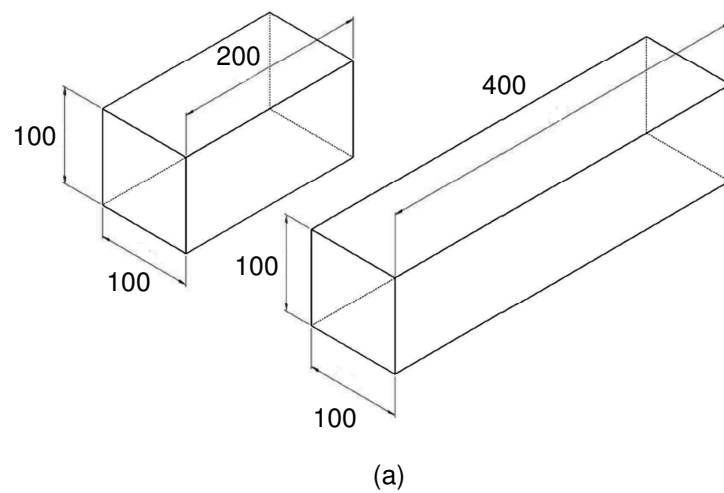
3.2 Materiais e equipamentos

O material utilizado para a realização dos ensaios foi o aço SAE 1045 laminado já cortado nas dimensões especificadas. A composição química fornecida pelo distribuidor em % em peso e a representação esquemática e real dos corpos de prova são apresentadas na Tabela 4 e Figura 26 respectivamente.

Tabela 4 – Composição química (% em peso) do aço SAE 1045 utilizado no trabalho.

Elemento	Al	C	Cr	Cu	Mn
% em peso	0,036	0,46	0,01	0,01	0,64
Elemento	N	Ni	P	S	Si
% em peso	0,012	0,01	0,016	0,005	0,15

Fonte: Próprio autor, baseado em dados do fornecedor AÇOLIVER, 2016.

Figura 26 – Representação (a) esquemática e (b) real dos corpos de prova.

Fonte: Próprio autor.

Com o objetivo de caracterizar os corpos de prova, foram realizadas medições de dureza Brinell nas amostras. Após leitura das medições das impressões permanentes através de um micrômetro, foi calculada a média da dureza e encontrado o valor aproximado de 173 HB. O ensaio de dureza está representado na Figura 27.

Figura 27 – (a) Ensaio de Dureza Brinell e (b) Durômetro.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

A máquina-ferramenta utilizada foi a fresadora ferramenta da DIPLOMAT, modelo FVF 3000 cujas características estão representadas na Figura 28 e Tabela 5.

Figura 28 – Fresadora ferramenta Diplomat FVF 3000.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Dados técnicos da fresadora ferramenta Diplomat FVF 3000.

Tamanho da mesa (mm)	305 x 1524
Curso longitudinal (X) /automático (mm)	1030 / 980
Curso transversal (Y) (mm)	405
Curso vertical (Z) (mm)	420
Potência do motor principal	5Hp 220V /380V – 03 fases – 60Hz
Rotação (RPM)	60 – 4000
Diâmetro da árvore (mm)	105
Curso da árvore (mm)	127
Avanço automático da árvore (mm)	0,04 / 0,08 / 0,15
Peso líquido aproximado (kg)	1600

Fonte: FRESADORA FERRAMENTEIRA FVF 3000, 2012 (adaptado).

Na Figura 29 mostra-se o corpo de prova fixado na mesa da fresadora.

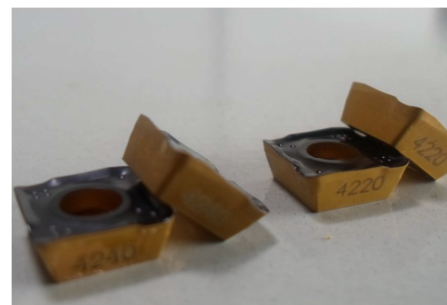
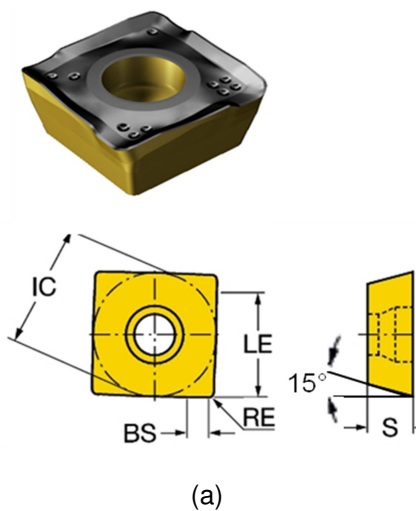
Figura 29 – Corpo de prova fixado na mesa da fresadora.



Fonte: Próprio autor.

As ferramentas de corte utilizadas no trabalho são de metal duro revestido fabricadas pela Sandvik Coromant modelos 490R-08T308M-PL 4220 e 490R-08T308M-PL 4240 cujas características e especificações estão representadas na Figura 30 e Tabela 6 respectivamente.

Figura 30 – Representação (a) esquemática e (b) real das ferramentas de metal duro classe 4220 e 4240.



Fonte: SANDVIK COROMANT, 2012 (adaptado).

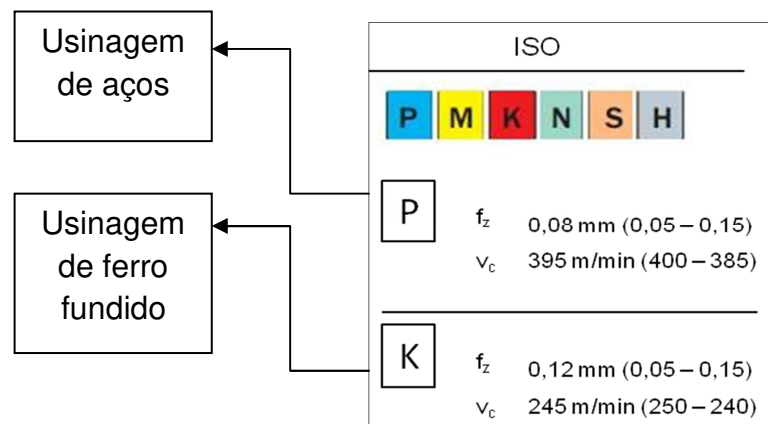
Tabela 6 – Especificações das ferramentas de metal duro classe 4220 e 4240.

Modelo 490R-08T308M-PL 4220 /PL 4240		
IC	Diâmetro do círculo inscrito	8,5 mm
LE	Comprimento efetivo de corte	5,6 mm
BS	Comprimento da aresta alisadora	1,2 mm
RE	Raio de canto	0,8 mm
S	Espessura da pastilha	3,3 mm
AN	Ângulo de folga principal	15 °
L	Comprimento da aresta de corte	8,5 mm
	Revestimento da pastilha	MTCVD
	Número de arestas de corte	4
	Tipo de operação	Passo largo (4220) Passo extrafino (4240)

Fonte: SANDVIK COROMANT, 2016 (adaptado).

As ferramentas de corte são geometricamente iguais. Porém a classe P40 pode ser aplicada em operações de passo extrafino, isto é, fresas com um número máximo de pastilhas onde mais de um dente pode estar em contato com a peça. São operações mais pesadas. Para ferramentas de tamanho aproximado de 8 mm, como as utilizadas, a profundidade de corte máxima é 5,6 mm e a recomendada pelo fabricante de 4 mm. A classe P20 possui, segundo fabricante, dureza aproximada de 1500 HV, grãos no substrato médio, cobertura de 10 µm de espessura e composição de Ti(C,N)-Al₂O₃ e TiN. A classe P40 tem dureza aproximada de 1300 HV grãos no substrato maiores, maior percentual de Co, cobertura de 8 µm de espessura e composição de Ti(C,N)-Al₂O₃ e TiN. As condições e parâmetros de usinagem recomendados vêm escritos na embalagem das ferramentas conforme Figura 31.

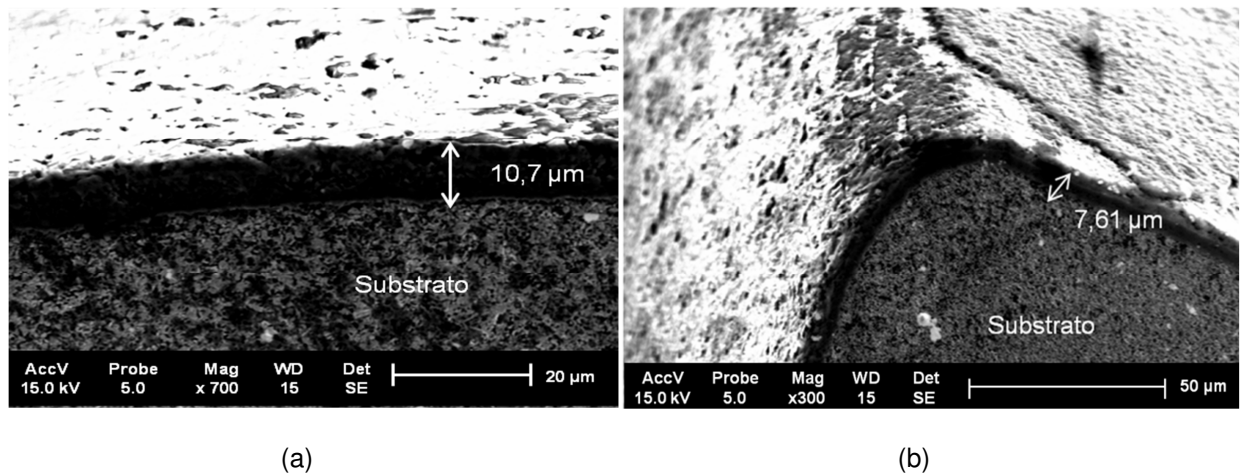
Figura 31 – Parâmetros e condições de usinagem recomendadas para classe 4220.



Fonte: SANDVIK COROMANT, 2012 (adaptado).

Visando observar as camadas de revestimentos das ferramentas utilizadas nos ensaios de fresamento, realizou-se um lixamento na sua seção transversal no sentido de avanço longitudinal. Após esse procedimento, a ferramenta foi embutida e polida com pasta diamantada. A região polida foi atacada com reagente químico Murakami, composto por 10 g de ferricianeto de potássio ($K_3Fe(CN)_6$), 10 g de hidróxido de potássio (KOH) e 100 ml de água destilada. Esse reagente é usado para atacar o carboneto de tungstênio (WC), aumentando a rugosidade da superfície do substrato, possibilitando sua identificação e separação da camada de revestimento. Após o ataque, as ferramentas foram levadas para o MEV que produziu imagens a partir de elétrons secundários. Na Figura 32 estão representados o substrato e a camada de revestimento das ferramentas classe P20 e P40.

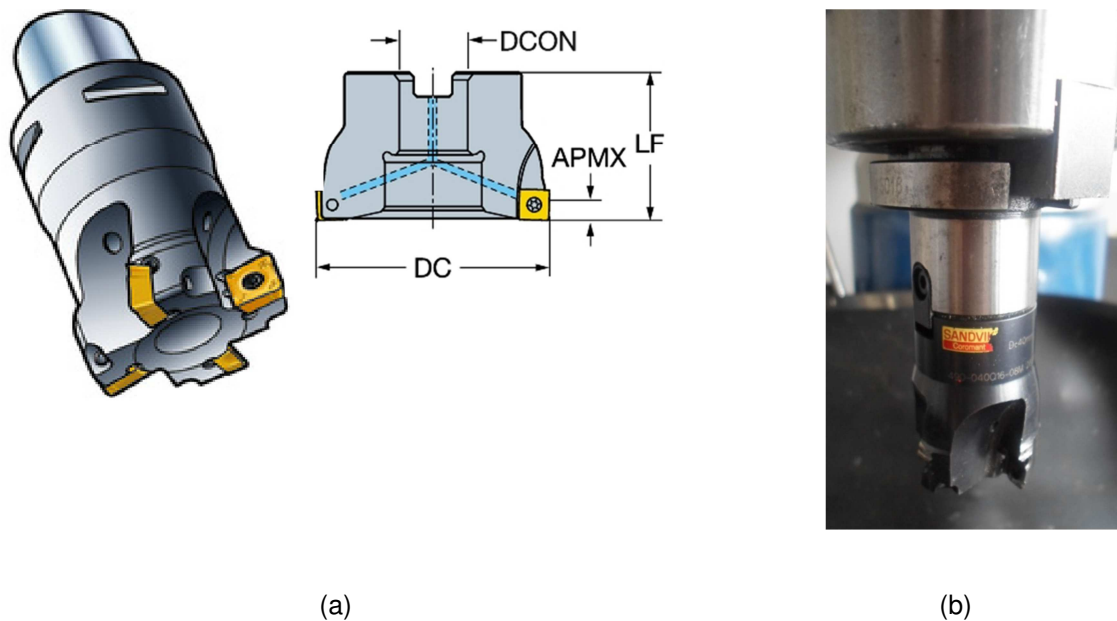
Figura 32 – Substrato e camada de revestimento das ferramentas de corte classe (a) P20 e (b) P40.



Fonte: Próprio autor.

As ferramentas foram montadas em um fresa da Sandvik Coromant modelo 490-040Q16-08M. As características da fresa e suas especificações são apresentadas na Figura 33 e Tabela 7 respectivamente. A fresa tem capacidade para suportar até 4 ferramentas e foram colocadas 4 ferramentas por ensaio.

Figura 33 – Representação (a) esquemática e (b) real da fresa CoroMill 490.



Fonte: SANDVIK COROMANT, 2016 (adaptado).

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Especificações da fresa CoroMill 490.

Fresa CoroMill 490-040Q16-08M		
DCON	Diâmetro de conexão	16 mm
APMX	Profundidade de corte máxima	5,5 mm
LF	Comprimento funcional	40 mm
DC	Diâmetro de corte	40 mm
χ_r	Ângulo de posição	90°
	Número de pastilhas	4
	Rotação máxima	29300 RPM
	Torque	1,2 Nm

Fonte: SANDVIK COROMANT, 2016 (adaptado).

Para medição do desgaste de flanco das ferramentas foi utilizado o microscópio de medição BK 70x50 da Zeiss com aumento de 30x e resolução de 0,001 mm. Na saída da lente ocular do equipamento foi adaptada uma câmera fotográfica Samsung com resolução de 16 Megapixels para a coleta das imagens. Na Figura 34 estão representados esses equipamentos.

Figura 34 – (a) Microscópio de medição Zeiss BK 70X50 e (b) Câmera Samsung 16MP.

(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Para avaliação dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura modelo SSX-550 da Shimadzu conforme Figura 35. Foram feitas imagens com ampliação de 60x e 120x de uma mesma região da ferramenta.

Figura 35 – Microscópio eletrônico de varredura Shimadzu SSX-550.



Fonte: Próprio autor

3.3 Procedimento experimental

A descrição do procedimento experimental foi dividida em cinco partes para melhor compreensão das etapas do trabalho. São as seguintes: Pré-testes; Seleção dos parâmetros; Ensaio de fresamento; Análise no microscópio ótico; Análise no MEV.

3.3.1 Pré-testes

Antes de dar início aos testes definitivos foram realizados pré-testes com parâmetros de usinagem baseados em trabalhos de outros autores. Os pré-testes foram executados com os mesmos corpos de prova e ferramentas dos testes definitivos, porém no caso das ferramentas, as arestas de corte foram outras.

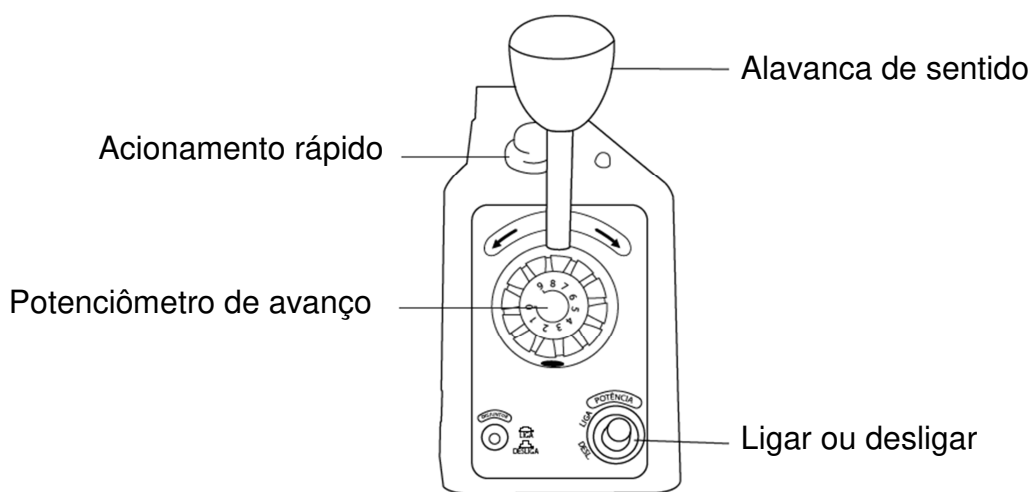
Os parâmetros utilizados inicialmente foram: frequência de rotação do eixo-árvore 1400 RPM; avanço de 0,465 mm/rev; profundidade de corte de 1 mm. Após três passes da ferramenta sobre a peça, a ferramenta era retirada da fresa, analisada no microscópio ótico e depois retornava para a fresa para iniciar um novo ciclo de corte. Esse processo foi repetido para nove, quinze e vinte e um passes. Ao final desses

procedimentos, percebeu-se que o desgaste produzido nas ferramentas era mínimo e que seria necessário um maior número de passes para gerar desgaste significativo. Testes realizados com maior número de passes foram feitos e o desgaste continuava insignificante. Essas condições de corte não eram as mais apropriadas para o par peça-ferramenta em termos de visualização do desgaste em um curto período de tempo. Diante disso e da limitação de material disponível, novos parâmetros de corte foram selecionados e descritos na seção seguinte.

3.3.2 Seleção dos parâmetros

O avanço da mesa da fresadora se dá no sentido longitudinal através de um potenciômetro que varia entre 0 e 9. Ele está localizado na alavanca de avanço rápido da mesa representada pela Figura 36.

Figura 36 – Representação da alavanca de avanço rápido da mesa.



Fonte: FRESADORA FERRAMENTEIRA FVF 3000, 2012.

A variação de velocidade é independente da rotação do eixo-árvore e como os valores de velocidade de avanço não foram apresentados no manual técnico, foi cronometrado o tempo gasto para o deslocamento da mesa da fresadora entre os cursos. Sob posse da distância entre o início e fim de curso e cronometrado o tempo de deslocamento, foi possível através da Equação 11 o cálculo da velocidade de avanço da mesa da fresadora para cada posição do potenciômetro de avanço. O tempo foi cronometrado três vezes e calculou-se a média desses valores.

$$v_f = d_1 / t \quad (11)$$

Onde:

d_1 = distância longitudinal entre os cursos da mesa da fresadora (mm);

t = tempo cronometrado do deslocamento da mesa da fresadora (min).

Os valores calculados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores calculados para velocidade de avanço.

Posição do potenciômetro de avanço	d_1 (mm)	Medição 1 (s)	Medição 2 (s)	Medição 3 (s)	Tempo médio (s)	v_f (mm/min)
0	640	0	0	0	0	-
1		227	228	220	225	170,67
2		115	105	116	112	342,86
3		81	89	81	83,67	458,96
4		75	71	67	71	540,84
5		67	71	66	68	564,71
6		66	63	67	65,33	587,75
7		61	60	61	60,67	632,97
8		62	59	58	59,67	643,54
9		59	61	57	59	650,85

Fonte: Próprio autor.

A frequência de rotação do eixo-árvore foi estabelecida em 2387 RPM através de um potenciômetro disponível no painel de controle da máquina. Com o objetivo de comprovar tal medida, utilizou-se um tacômetro digital com mira laser. O potenciômetro ajustado e o tacômetro são apresentados na Figura 37. A profundidade de corte foi de 2 mm.

A partir da velocidade de avanço calculada para cada posição do potenciômetro de avanço, foi possível juntamente com as características da fresa, da ferramenta e a frequência de rotação do eixo-árvore obter os valores de avanço por dente (f_z) e

avanco por revolução (f) para as 10 posições utilizando as Equações 1, 2 e 4 conforme Tabela 9.

Figura 37 – (a) Potenciômetro ajustado e (b) Tacômetro digital com mira laser.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

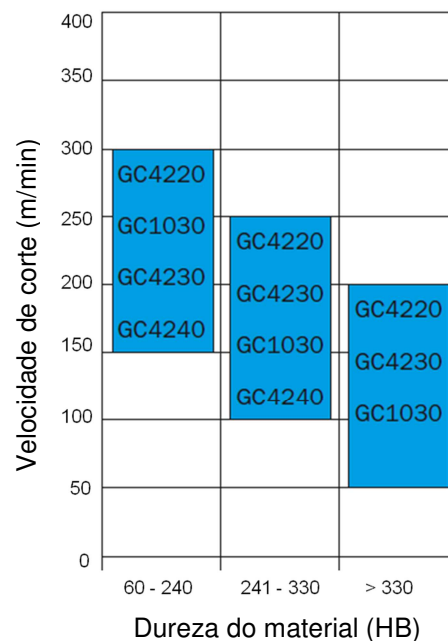
Tabela 9 – Valores obtidos do avanço por dente e avanço por revolução.

Posição do potenciômetro de avanço	V_f (mm/min)	f_z (mm/dente)	f (mm/rev)	Diâmetro da fresa (mm)	Rotação do eixo-árvore (RPM)
0	-	-	-	40	2387
1	170,67	0,02	0,071	V_c (m/min)	Número de arestas cortantes
2	342,86	0,04	0,144	300	4
3	458,96	0,05	0,192		
4	540,84	0,06	0,226		
5	564,71	0,06	0,236		
6	587,75	0,06	0,246		
7	632,97	0,07	0,265		
8	643,54	0,07	0,269		
9	650,85	0,07	0,272		

Fonte: Próprio autor.

A velocidade de corte sugerida na embalagem para as ferramentas P20 e P40 é respectivamente 395 e 270 m/min pra usinagem de aços, ou seja, para a rotação selecionada a velocidade de corte obtida fica no intervalo entre esses dois valores. O manual técnico do fabricante aponta as ferramentas da série GC4200 com revestimento MTCVD como a escolha básica no fresamento de aços. Além disso, apontam uma faixa de velocidades recomendada de acordo com a dureza do material base conforme Figura 38. Os ensaios foram realizados nessas condições e não se verificou comportamento adverso.

Figura 38 – Recomendações de velocidade de corte e de classe referentes à dureza do material.



Fonte: Próprio autor.

Considerando que as condições são semelhantes entre as últimas posições do potenciômetro de avanço, optou-se por utilizar no trabalho a posição 9 e, portanto, as características de $v_f = 650,85$ mm/min, $f_z = 0,07$ mm/dente e $f = 0,272$ mm/rev. Em resumo, os principais parâmetros de corte são:

- $V_c = 300$ m/min;
- $a_p = 2$ mm;

- $n = 2387 \text{ RPM};$
- $f = 0,272 \text{ mm/rev};$
- $f_z = 0,07 \text{ mm/dente}.$

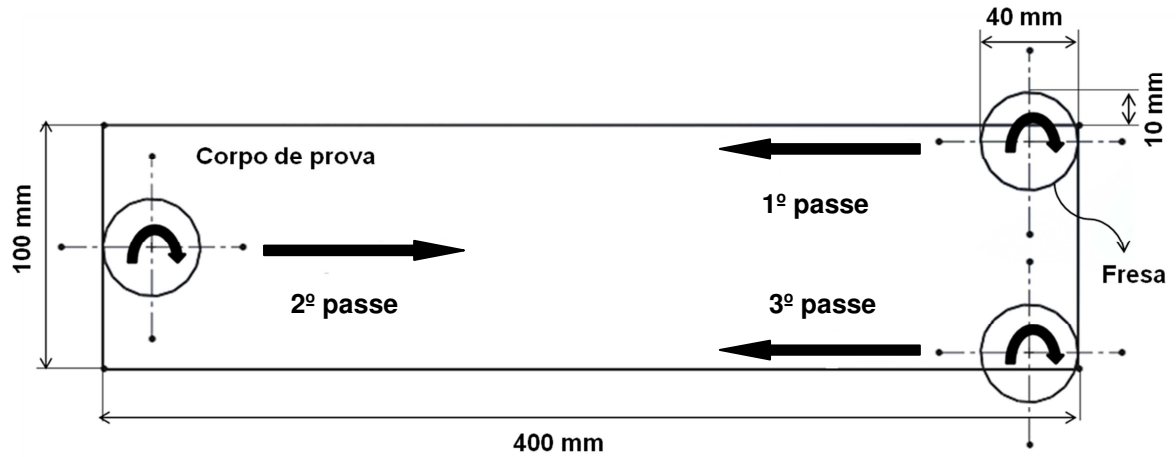
3.3.3 Ensaio de fresamento

Ensaio de fresamento frontal foram realizados ao longo dos comprimentos de 200 mm e 400 mm dos corpos de prova, com quatro ferramentas de corte montadas na fresa. Antes da realização dos ensaios, as barras foram faceadas com o objetivo de retirar a camada de óxido e tornar a superfície mais regular possível. A Figura 39 é a representação esquemática do ensaio de fresamento onde estão ilustradas algumas dimensões, o posicionamento relativo entre a fresa e o corpo de prova e os três primeiros passes da ferramenta sobre a peça de comprimento de 400 mm. Para o comprimento de 200 mm a representação é semelhante. A fresa não possui movimento de translação e, portanto, é apenas a mesa sobre a qual a peça está fixada que realiza o movimento de avanço longitudinal, transversal e vertical. O sentido de movimento de avanço da mesa é alternado, isto é, caso no primeiro passe o sentido de avanço fora da esquerda para direita, o segundo passe será da direita para esquerda até completar os três primeiros passes. Após essa bateria, a mesa é elevada em 2 mm e inicia-se um novo ciclo de corte. Todos os ensaios foram realizados na condição a seco.

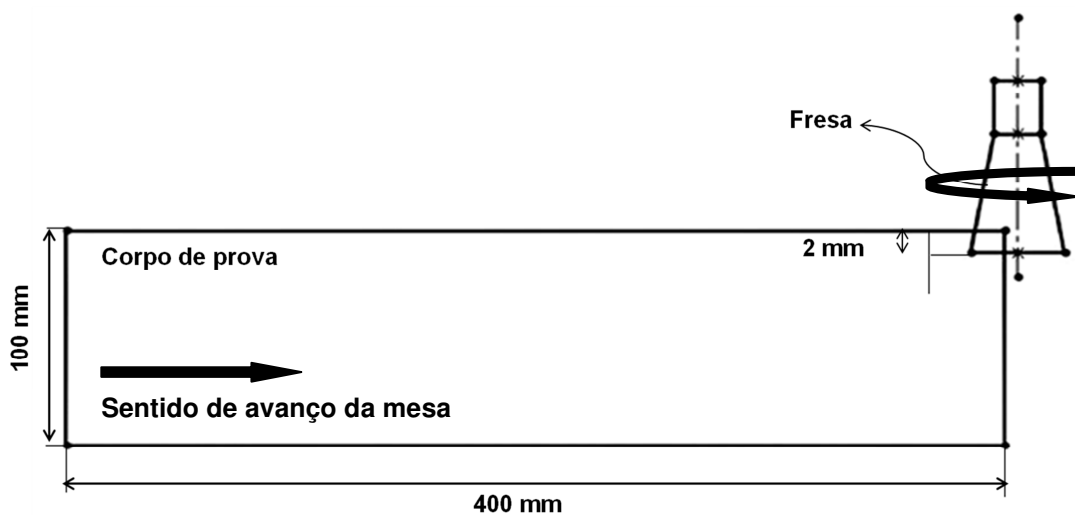
O número de ciclos termomecânicos (NCTM) sofridos pelas ferramentas é diferente para cada comprimento do corpo de prova. Desconsiderando os ciclos de entrada e saída, o percurso de avanço é 180 e 360 mm para os corpos de 200 e 400 mm respectivamente. O NCTM é calculado pela Equação 12.

$$\text{NCTM} = \frac{180 \text{ ou } 360}{f_z} \quad (12)$$

Figura 39 – Representação esquemática da (a) vista superior e (b) vista lateral do ensaio de fresamento frontal para $L = 400$ mm.



(a)

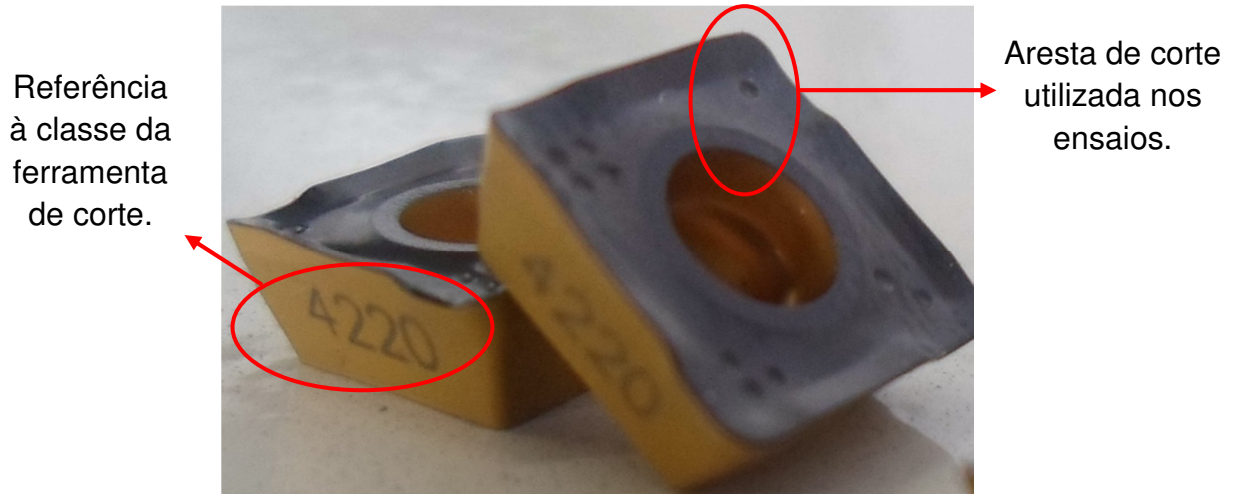


(b)

Fonte: Próprio autor.

Com o uso dessa metodologia, tornou-se necessário identificar as ferramentas, a aresta de corte utilizada e a posição por elas ocupada na fresa. As ferramentas possuem na sua face superior marcações de fábrica que identificam as arestas de corte e em uma das suas faces laterais uma referência à classe conforme Figura 40. Para os testes definitivos foram utilizadas as arestas com a marcação 1.

Figura 40 – Marcas identificadoras da classe e aresta de corte da ferramenta.



Fonte: Próprio autor.

A posição ocupada pelas ferramentas de corte na fresa segue a referência da Figura 41. A posição 1 está localizada abaixo do símbolo destacado e as posições seguintes 2, 3 e 4 seguem no sentido anti-horário.

Figura 41 – Posições ocupadas pelas ferramentas de corte na fresa.



Fonte: Próprio autor.

Foram ao todo dezesseis ferramentas de corte numeradas de 1 a 16 da seguinte forma:

- **1 a 4: classe P20 utilizadas no corpo de prova com L = 200 mm;**
- **5 a 8: classe P20 utilizadas no corpo de prova com L = 400 mm;**
- **9 a 12: classe P40 utilizadas no corpo de prova com L = 200 mm;**
- **13 a 16: classe P40 utilizadas no corpo de prova com L = 400 mm.**

Os testes foram divididos em baterias de ensaios de fresamento e análises no microscópio ótico e MEV. As baterias foram divididas em números fixos de passes das ferramentas sobre a peça. Os números de passes estabelecidos foram: 3; 9; 15; 21. Portanto, após o terceiro, nono, décimo quinto e vigésimo primeiro passes, as ferramentas eram retiradas e analisadas. A ideia inicial era levar as ferramentas de corte até o fim de vida, porém observou-se que a progressão de desgaste estava ocorrendo de modo lento e que o material disponível não seria o suficiente para a quantidade de passes necessária. Optou-se por padronizar o número de passes para cada condição. A Tabela 10 resume a matriz de experimentos.

Tabela 10 – Resumo da matriz de experimentos realizados.

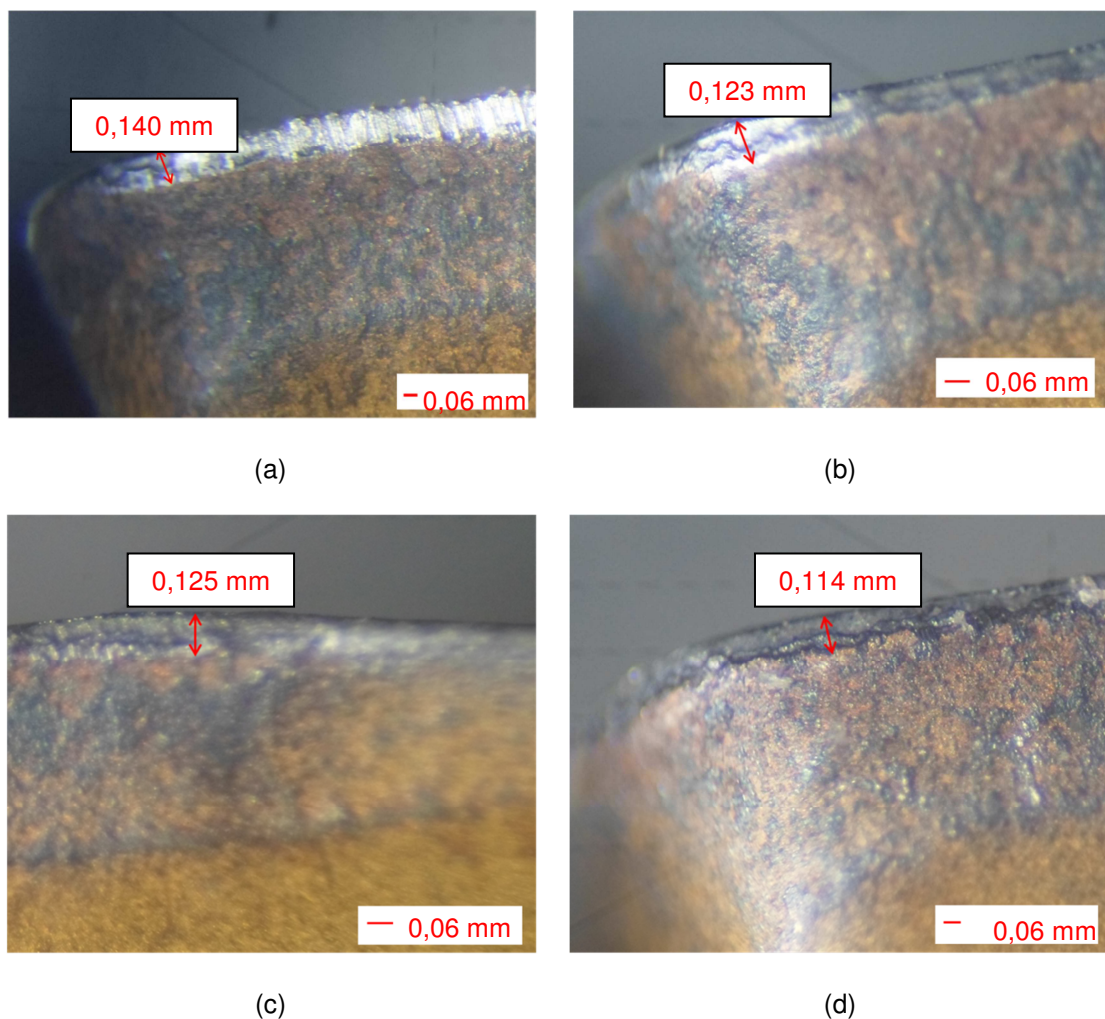
Ferramenta de corte (classe)	Comprimento do corpo de prova (mm)	Número de identificação	Posição na fresa	Número de passes	Comprimento usinado (mm)
P20	200	1	1	3, 9, 15 e 21	600, 1800, 3000 e 4200
		2	2		
		3	3		
		4	4		
P40	200	5	1	3, 9, 15 e 21	600, 1800, 3000 e 4200
		6	2		
		7	3		
		8	4		
P20	400	9	1	3, 9, 15 e 21	1200, 3600, 6000 e 8400
		10	2		
		11	3		
		12	4		
P40	400	13	1	3, 9, 15 e 21	1200, 3600, 6000 e 8400
		14	2		
		15	3		
		16	4		

Fonte: Próprio autor.

3.3.4 Análise no microscópio ótico

A análise no microscópio ótico consistiu na observação e registro do desgaste de flanco apresentado na ferramenta após um número fixo de passes sobre o corpo de prova. A superfície considerada foi a principal de folga, porém a superfície lateral de folga também foi analisada apresentando comportamento semelhante. Foram realizadas medições ao longo da superfície principal de folga e registrado o $VB_{BM\acute{A}X}$ para cada condição. Como a fresa aloca 4 ferramentas, mediu-se o $VB_{BM\acute{A}X}$ de cada uma e por fim foram calculados a média e o desvio padrão desses valores. A Figura 42 ilustra as medições do desgaste para as ferramentas classe P20 no fresamento do corpo de prova de 400 mm após 15 passes.

Figura 42 – $VB_{BM\acute{A}X}$ para as ferramentas (a) 9, (b) 10, (c) 11 e (d) 12 classe P20, L= 400 mm após 15 passes.



Fonte: Próprio autor.

No exemplo acima, a média do $VB_{BMÁX}$ é 0,125 mm com um desvio padrão de 0,011 mm.

3.3.5 Análise no MEV

A análise no MEV consistiu na observação dos aspectos gerais da ferramenta e identificação dos mecanismos de desgaste para cada condição. Após análise no microscópio ótico, as ferramentas eram conduzidas até o laboratório de Caracterização. Inicialmente passaram por um processo de limpeza com foco na aresta cortante utilizada nos ensaios de fresamento. Para isso, extremidades de hastes flexíveis eram imersas em álcool e friccionadas na região de desgaste da ferramenta. Uma vez finalizada a limpeza, as ferramentas eram fixadas na porta-amostra do MEV com auxílio de fitas de carbono dupla face. A porta-amostra possui capacidade para até doze amostras por vez, porém os ensaios foram realizados com capacidade máxima de sete amostras, pois havia apenas sete suportes de ferramentas de fresamento. Na Figura 43 estão representados a porta-amostra e um dos sete suportes utilizados para as ferramentas.

Figura 43– Porta-amostra e suporte pra ferramentas de fresamento utilizados no MEV.



Fonte: Próprio autor.

Em cada ferramenta de corte analisada, foi feita uma imagem com ampliação de 120x da região.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos através da metodologia descrita anteriormente. Os dados obtidos foram analisados estatisticamente através do software Action Stat versão 3.1.43.724.694 em conjunto com o Microsoft Excel.

4.1 Influência da dimensão da peça na evolução do desgaste para a ferramenta da classe P20

Na Tabela 11 são apresentados os resultados quantitativos para a ferramenta de corte da classe P20 após fresamento a seco através dos comprimentos usinados de 600, 1800, 3000 e 4200 mm que correspondem respectivamente a 3, 9, 15 e 21 passes sobre o corpo de prova de 200 mm de comprimento.

Tabela 11 – Resultados quantitativos para a ferramenta P20 no fresamento do corpo de prova de 200 mm.

Ferramenta de corte (classe)	Número de Passes	Número de identificação	VB _{BMÁX} (mm)	VB _{BMÁX} Médio (mm)	σ (mm)
P20	3	1	0,085	0,077	0,010
		2	0,073		
		3	0,085		
		4	0,065		
	9	1	0,108	0,107	0,009
		2	0,105		
		3	0,118		
		4	0,097		
	15	1	0,145	0,134	0,032
		2	0,122		
		3	0,172		
		4	0,097		
	21	1	0,156	0,153	0,008
		2	0,143		
		3	0,150		
		4	0,162		

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados quantitativos para a ferramenta de corte da classe P20 após fresamento a seco através dos comprimentos usinados de 1200, 3600, 6000 e 8400 mm que correspondem respectivamente a 3, 9, 15 e 21 passes sobre o corpo de prova de 400 mm de comprimento.

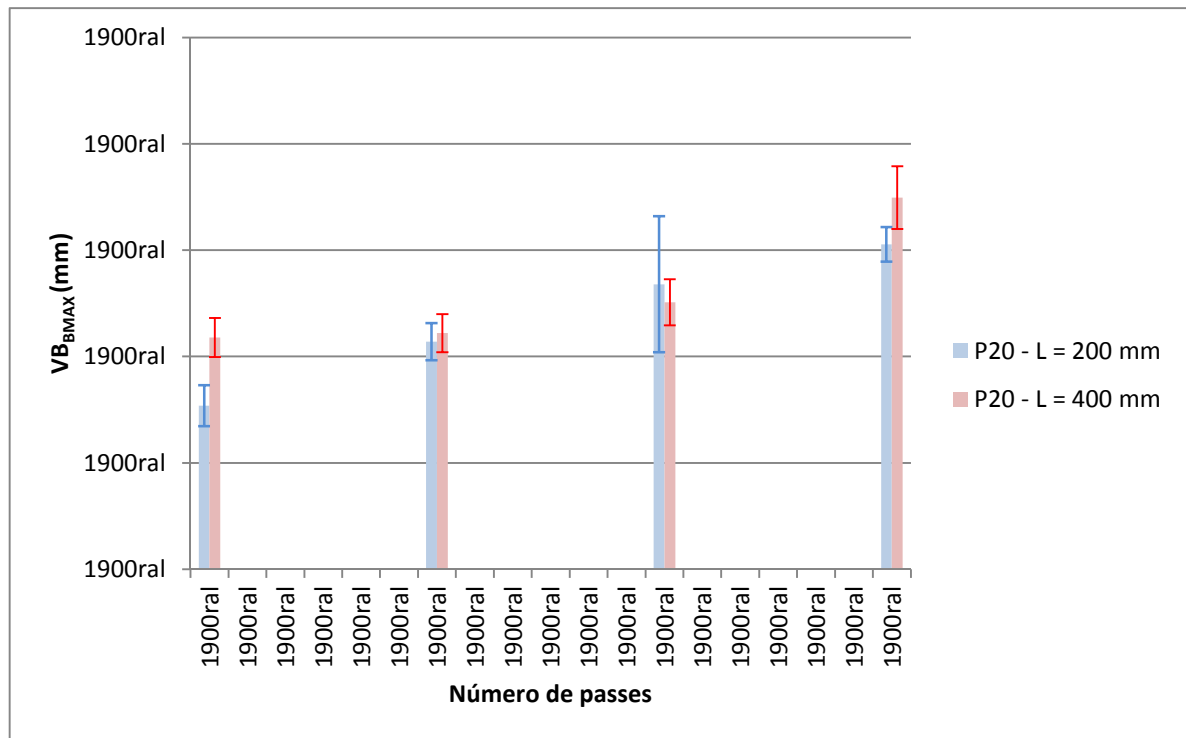
Tabela 12 – Resultados quantitativos para a ferramenta P20 no fresamento do corpo de prova de 400 mm.

Ferramenta de corte (classe)	Número de Passes	Número de identificação	VB _{BMÁX} (mm)	VB _{BMÁX} Médio (mm)	σ (mm)
P20	3	9	0,114	0,109	0,009
		10	0,107		
		11	0,118		
		12	0,097		
	9	9	0,111	0,111	0,009
		10	0,122		
		11	0,100		
		12	0,111		
	15	9	0,140	0,126	0,011
		10	0,123		
		11	0,125		
		12	0,114		
	21	9	0,188	0,175	0,015
		10	0,187		
		11	0,162		
		12	0,162		

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 44 está representado o gráfico de desgaste de flanco máximo em função do número de passes para a ferramenta da classe P20 comparando o desempenho obtido para os diferentes comprimentos do corpo de prova.

Figura 44– Desgaste de flanco máximo ($VB_{BM\acute{A}X}$) em função do número de passes para a ferramenta P20 para diferentes comprimentos do corpo de prova.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que em nenhuma das condições foi atingido o critério de fim de vida das ferramentas correspondente ao $VB_{BM\acute{A}X} = 0,6$ mm. Os desgastes foram pequenos, porém suficientes para avaliar o comportamento em função do comprimento usinado. Segundo Diniz, Marconi e Coppini (2010), com o uso de ferramentas de metal duro revestido, a progressão do desgaste de flanco é muito lenta devido à alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura.

Nota-se que tanto para o corpo de prova de 200 mm quanto para o de 400 mm, a ferramenta P20 apresentou uma progressão de desgaste em função do número de passes. Para o de 200 mm, essa progressão se dá de forma aparentemente linear quando analisamos os números absolutos. Entretanto, estatisticamente, não se pode afirmar que o valor do desgaste para 9 passes difere do valor de 15 passes nem este último em comparação à 21 passes. Para o de 400 mm, a ferramenta sofre um desgaste maior nos primeiros passes em relação ao corpo de menor comprimento, porém mantém um nível de desgaste constante nas próximas passadas e um aumento considerável de 15 para 21 passes. Em termos de valores absolutos, o desempenho foi semelhante. Na Tabela 13 está representada a diferença em

números absolutos e em percentual entre o desgaste de flanco máximo obtido pela ferramenta P20 para $L = 400$ mm e 200 mm em função do número de passes.

Tabela 13 – Diferença absoluta e percentual entre VB_{MAX} dos diferentes comprimentos do corpo de prova em função do número de passes para classe P20.

Ferramenta de corte (classe)	Número de Passes	Diferença absoluta (mm)	Diferença percentual (%)
P20	3	0,032	29
	9	0,004	4
	15	0,009	6
	21	0,022	13

Fonte: Próprio autor.

De forma geral, o fresamento do corpo de prova de maior comprimento gera um maior desgaste na ferramenta de corte em comparação ao corpo de menor comprimento, porém não existe diferença significativa a ponto de afirmar que maior dimensão da peça significa mais desgaste gerado. A maior diferença ocorre nos primeiros passes. Nos seguintes, a hipótese do desgaste ser igual não pode ser descartada e por fim o fresamento do maior corpo de prova apresenta desgaste sutilmente maior. Caso os testes prosseguissem até o critério de fim de vida das ferramentas, a resposta sobre qual condição apresenta melhor desempenho em termos de passadas não é clara.

No corte interrompido, consideram-se fatores relevantes no desempenho da ferramenta: NCTM, que também está relacionado com o número de impactos; as entradas e saídas que correspondem ao número de passes; variações na temperatura ($\Delta T = T_1 - T'_1$). O NCTM da ferramenta do corpo de prova de maior comprimento é o dobro do corpo de menor comprimento, visto que é função do comprimento da peça. O número de entradas e saídas é exatamente o número de passes que é igual para ambas as condições. As variações de temperaturas ocorrem através do tempo de corte e, portanto, a ferramenta utilizada no maior corpo de prova apresenta um maior número de variações durante o corte. Em resumo e com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o número de entradas e saídas é o fator de maior relevância em termos de desgaste nas arestas de corte da ferramenta classe P20, uma vez que o mesmo número de passes em corpos prova

de dimensões diferentes com todos os outros parâmetros de corte constantes resultaram em desgastes praticamente iguais.

4.2 Influência da dimensão da peça na evolução do desgaste para a ferramenta da classe P40

Na Tabela 14 são apresentados os resultados quantitativos para a ferramenta de corte da classe P40 após fresamento a seco através dos comprimentos usinados de 600, 1800, 3000 e 4200 mm que correspondem respectivamente a 3, 9, 15 e 21 passes sobre o corpo de prova de 200 mm de comprimento.

Tabela 14 – Resultados quantitativos para a ferramenta P40 no fresamento do corpo de prova de 200 mm.

Ferramenta de corte (classe)	Número de Passes	Número de identificação	VB _{BMÁX} (mm)	VB _{BMÁX} Médio (mm)	σ (mm)
P40	3	5	0,072	0,085	0,010
		6	0,094		
		7	0,081		
		8	0,093		
	9	5	0,098	0,100	0,005
		6	0,101		
		7	0,095		
		8	0,106		
	15	5	0,093	0,133	0,031
		6	0,129		
		7	0,141		
		8	0,169		
	21	5	0,128	0,140	0,011
		6	0,135		
		7	0,152		
		8	0,145		

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados quantitativos para a ferramenta de corte da classe P40 após fresamento a seco através dos comprimentos usinados de 1200, 3600, 6000 e 8400 mm que correspondem respectivamente a 3, 9, 15 e 21 passes sobre o corpo de prova de 400 mm de comprimento.

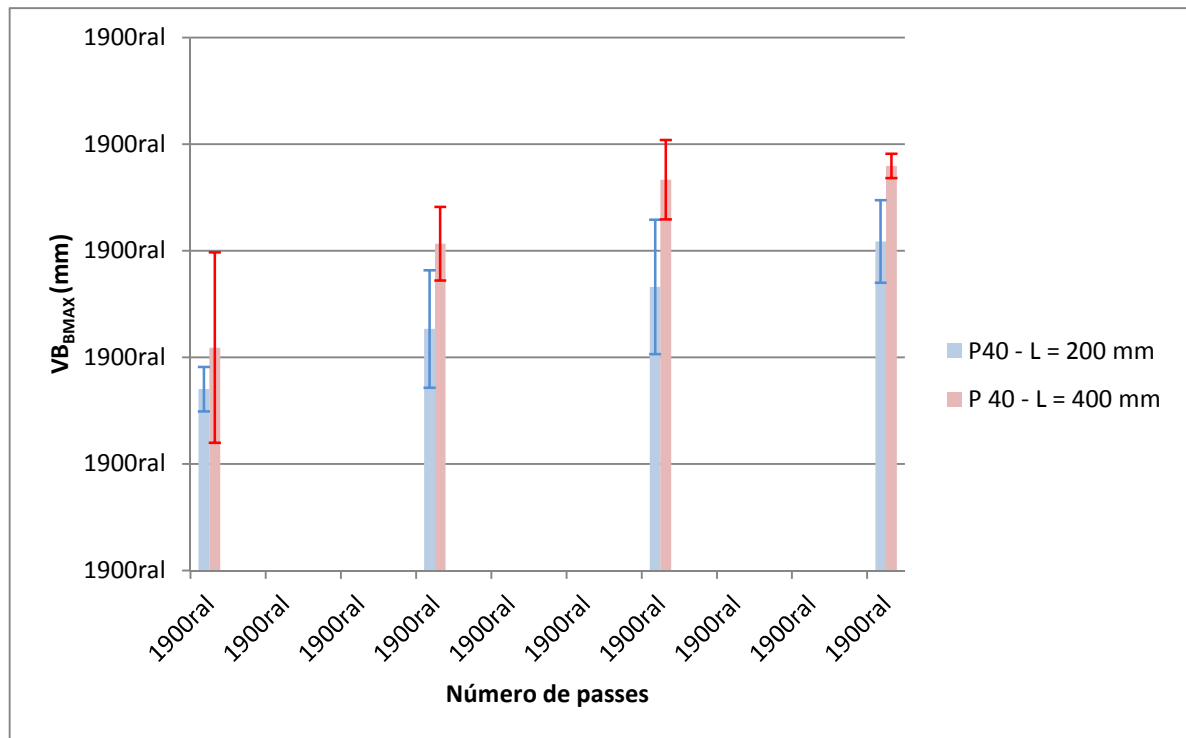
Tabela 15 – Resultados quantitativos para a ferramenta P40 no fresamento do corpo de prova de 400 mm.

Ferramenta de corte (classe)	Número de Passes	Número de identificação	VB _{BMÁX} (mm)	VB _{BMÁX} Médio (mm)	σ (mm)
P40	3	13	0,164	0,105	0,045
		14	0,079		
		15	0,063		
		16	0,112		
	9	13	0,164	0,151	0,014
		14	0,139		
		15	0,139		
		16	0,161		
	15	13	0,168	0,180	0,012
		14	0,181		
		15	0,196		
		16	0,174		
	21	13	0,186	0,190	0,006
		14	0,189		
		15	0,186		
		16	0,198		

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 45 está representado o gráfico de desgaste de flanco máximo em função do número de passes para a ferramenta da classe P40 comparando o desempenho obtido para os diferentes comprimentos do corpo de prova.

Figura 45– Desgaste de flanco máximo ($VB_{BM\acute{A}X}$) em função do número de passes para a ferramenta P40 para diferentes comprimentos do corpo de prova.



Fonte: Próprio autor.

Assim como no caso da classe P20, nenhuma das condições para a classe P40 atingiu o critério de fim de vida das ferramentas correspondente ao $VB_{BM\acute{A}X} = 0,6$ mm. Verifica-se que após os três primeiros passes as ferramentas apresentaram desgastes estatisticamente iguais. Nas passadas seguintes, o fresamento do corpo de prova de maior comprimento apresentou comparativamente maior desgaste do que o de menor comprimento. Em termos de valores absolutos, a ferramenta para o corpo de 200 mm apresentou uma progressão linear. Já o corpo de 400 mm uma progressão tendendo a um valor constante até o final do vigésimo primeiro passe.

Na Tabela 16 está representada a diferença em números absolutos e em percentual entre o desgaste de flanco máximo obtido pela ferramenta P40 para $L = 400$ mm e 200 mm em função do número de passes.

Observa-se que as diferenças são, comparativamente à classe P20, mais significativas, porém não podemos afirmar em qual das condições a ferramenta atingiria em menor número de passes o fim de vida. Estatisticamente, os desgastes

são bem próximos reforçando a ideia do número de entradas e saídas ser fator preponderante no desgaste das arestas de corte.

Tabela 16 – Diferença absoluta e percentual entre $VB_{B\text{M}\text{A}\text{X}}$ dos diferentes comprimentos do corpo de prova em função do número de passes para classe P40.

Ferramenta de corte (classe)	Número de Passes	Diferença absoluta (mm)	Diferença percentual (%)
P40	3	0,020	19
	9	0,051	34
	15	0,047	26
	21	0,050	26

Fonte: Próprio autor.

4.3 Comparação de desempenho entre as classes P20 e P40

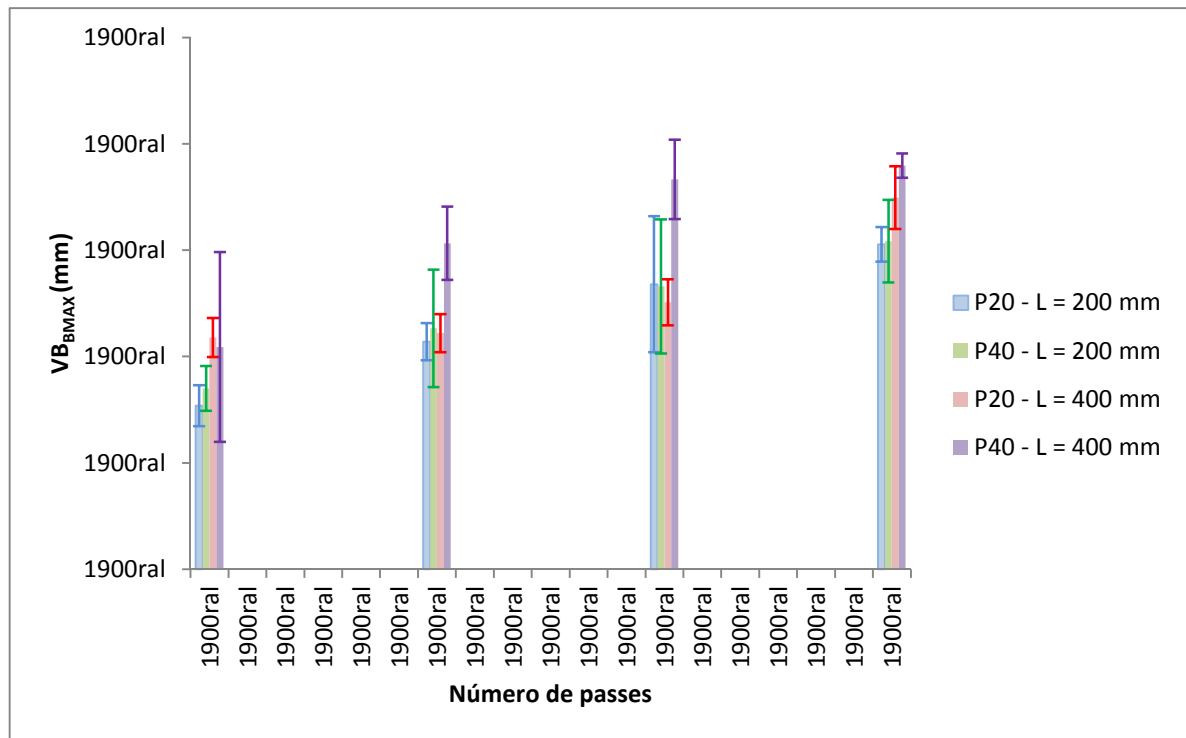
Na Figura 46 está representado o gráfico de desgaste de flanco máximo em função do número de passes para as ferramentas da classe P20 e P40 comparando o desempenho entre as classes para os diferentes comprimentos do corpo de prova. Na Tabela 17 está representada a diferença em números absolutos e em percentual entre o desgaste de flanco máximo obtido entre as ferramentas P40 e P20 para $L = 400$ mm e 200 mm em função do número de passes.

Tabela 17 – Diferença absoluta e percentual entre $VB_{B\text{M}\text{A}\text{X}}$ dos diferentes comprimentos do corpo de prova em função do número de passes para classe P40.

Comprimento do corpo de prova (mm)	Número de passes	Diferença absoluta (mm)	Diferença percentual (%)
200	3	0,008	10
	9	0,006	6
	15	0,001	1
	21	0,002	1
400	3	0,004	4
	9	0,042	28
	15	0,058	32
	21	0,015	8

Fonte: Próprio autor.

Figura 46— Desgaste de flanco máximo ($VB_{B\text{M}\text{ÁX}}$) em função do número de passes para as classes P20 e P40 para diferentes comprimentos do corpo de prova.



Fonte: Próprio autor.

Para os corpos de prova de 200 mm, o desempenho das ferramentas foi semelhante. Estatisticamente, a hipótese dos desgastes serem iguais em cada ciclo de corte não pode ser descartada mesmo a ferramenta P40 apresentando em valores absolutos maior valor de desgaste de flanco. Já para o corpo de prova de 400 mm, a ferramenta P20 apresentou desempenho superior nos primeiros passes e após o vigésimo primeiro passe um desgaste semelhante. Apesar do comportamento próximo das duas classes, caso os testes prosseguissem até o final de vida da ferramenta acredita-se em um desempenho superior da classe P20, visto que a composição das ferramentas em termos de tamanho médio dos grãos de carbonetos no substrato e espessura de revestimento revela uma maior susceptibilidade da classe P40 ao desgaste de flanco pela atuação dos mecanismos de desgaste. A classe P40 é mais sensível à mudança do comprimento do corpo de prova do que a P20. Porém, devido a sua maior dureza, a classe P20 pode sofrer lascamentos antes mesmo de atingir o critério de final de vida do $VB_{B\text{M}\text{ÁX}}$ e falhar de forma catastrófica. Em resumo, a ferramenta P20 apresentou ao longo do corte valores absolutos menores de desgaste de flanco em comparação à ferramenta P40.

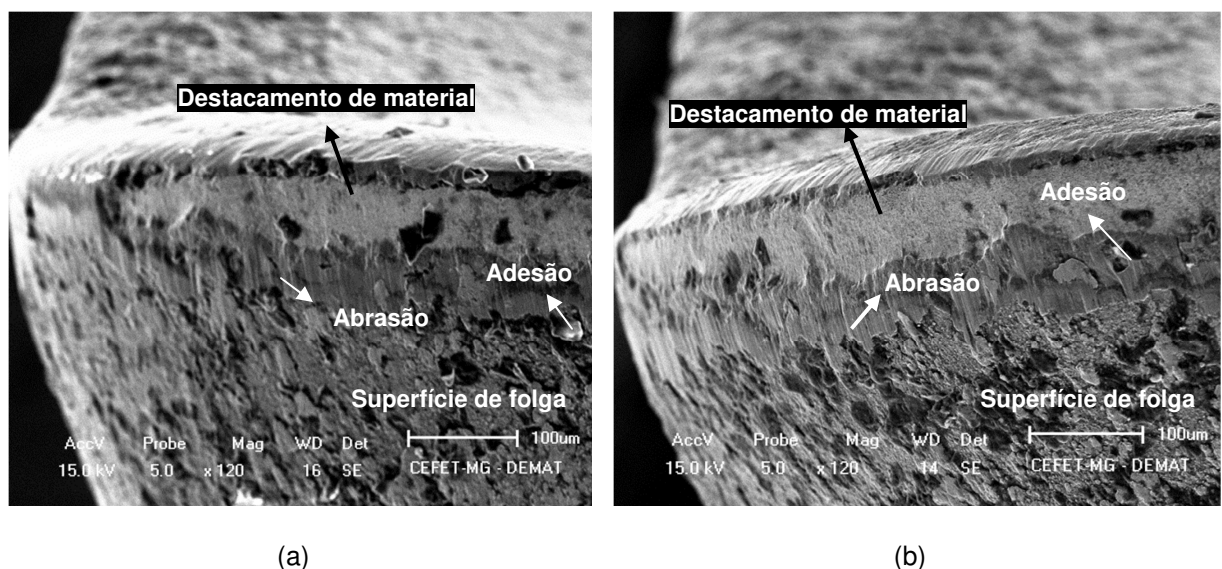
Essa diferença é mais significativa no corte da peça de maior comprimento onde há maior atuação dos mecanismos de desgaste ao longo do tempo. Portanto, os valores distintos entre as classes para um mesmo comprimento revelam a influência de outros fatores no desgaste das ferramentas, porém os valores próximos reforçam a relevância do número de entradas e saídas.

4.4 Análise do aspecto geral das ferramentas e mecanismos de desgaste

Tendo em vista a numerosa quantidade de imagens realizadas, optou-se por apresentar as imagens de algumas ferramentas após 21 passes sobre o corpo de prova onde é possível analisar o aspecto geral e comparar as diferentes condições.

Na Figura 47 estão representados os aspectos dos desgastes das ferramentas de metal duro classe P20 após 21 passes sobre o corpo de prova de comprimento $L = 200$ mm e 400 mm com ampliação de 120x de uma mesma região.

Figura 47 – Aspectos dos desgastes das ferramentas de metal duro classe P20 após 21 passes sobre o corpo de (a) 200 mm e (b) 400 mm com ampliação de 120x.



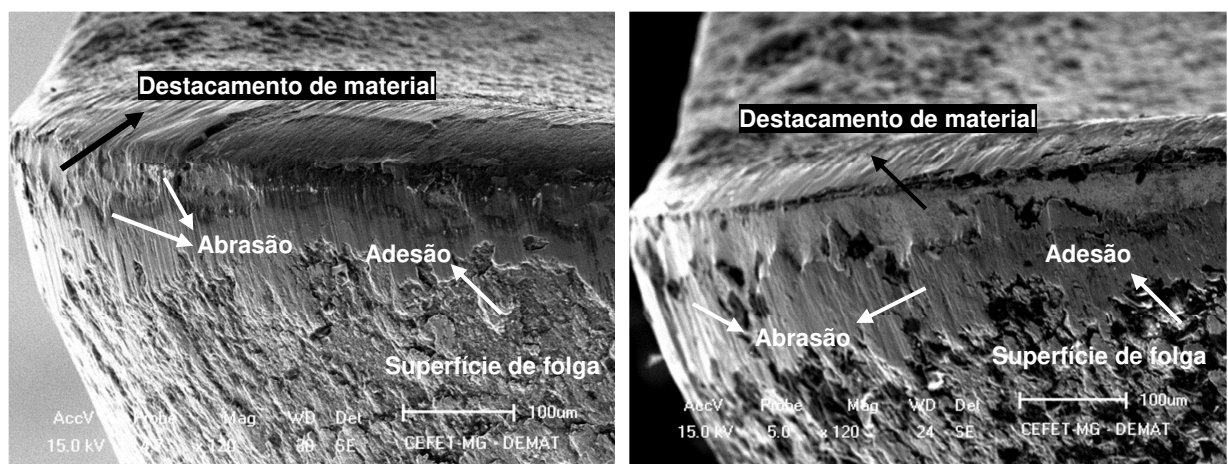
Fonte: Próprio autor.

Observa-se que o destacamento de material abrange uma maior área na superfície de folga principal da ferramenta P20 quando no fresamento do corpo de prova de maior comprimento, fato que pode ser justificado pelo maior número de impactos

nessa condição. No entanto, o aspecto do desgaste é semelhante e como já vimos anteriormente o $VB_{\text{MÁX}}$ é estatisticamente igual. Em geral, o mecanismo de desgaste identificado foi o abrasivo, pequenas marcas de adesão e destacamento de material. O abrasivo é caracterizado pela formação de pequenos sulcos ou microlascamentos na superfície da ferramenta na direção do fluxo de material pelo desprendimento de partículas duras que são os abrasivos responsáveis pelo desgaste da ferramenta. O aspecto das ferramentas é bem semelhante ao final dos 21 passes.

Na Figura 48 estão representadas as ferramentas de metal duro classe P40 após 21 passes sobre o corpo de prova de comprimento $L = 200 \text{ mm}$ e 400 mm com ampliação de $120\times$.

Figura 48 – Aspectos dos desgastes das ferramentas de metal duro classe P40 após 21 passes sobre o corpo de (a) 200 mm e (b) 400 mm com ampliação de $120\times$.



(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

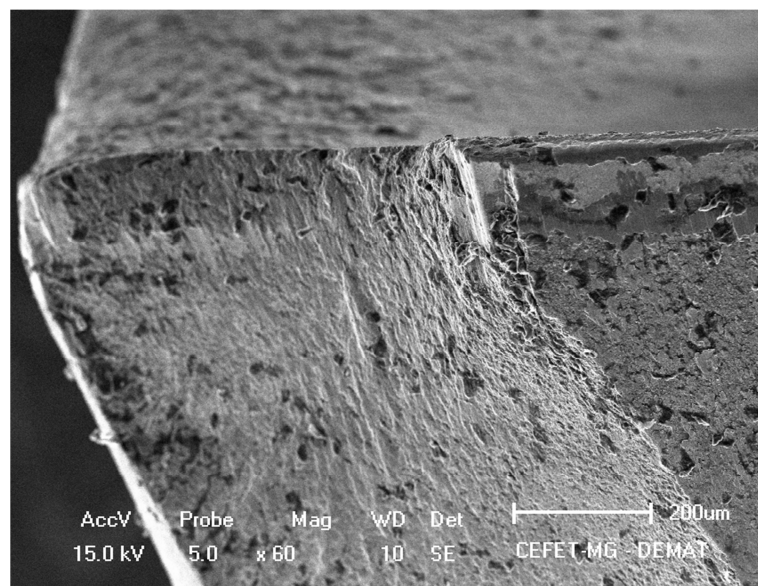
Assim como para a ferramenta classe P20, a classe P40 apresenta entre si aspecto do desgaste semelhante. A área de destacamento de material é maior para o corpo de prova de maior comprimento. Os mecanismos de desgaste atuantes identificados são o abrasivo e o adesivo.

Comparando as imagens das ferramentas P20 e P40, percebe-se que os desgastes são dimensionalmente próximos. Porém, a região de destacamento de material é

maior para a classe P20 que possui maior dureza e, portanto, é esperado menor resistência aos choques mecânicos característicos do corte interrompido. Observam-se também regiões mais pronunciadas de desgaste abrasivo na ferramenta P40 confirmando a teoria da maior susceptibilidade dessa classe ao desgaste de flanco gerado principalmente por esse mecanismo através do movimento relativo entre a superfície dura da peça e a ferramenta.

Como previsto anteriormente, a classe P20 por possuir maior dureza têm maior tendência de sofrer quebras ou lascamentos durante o corte. Durante os pré-testes, as condições de corte selecionadas foram bem abaixo das críticas ou recomendadas e uma das ferramentas P20 sofreu lascamento antes mesmo de atingir um desgaste de flanco significativo como ilustrado pela Figura 49.

Figura 49 – Lascamento da ferramenta P20 durante realização de pré-testes.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES

De acordo com a análise de resultados e discussões conclui-se para o estudo da influência das dimensões da peça na evolução de desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento que:

- O número de entradas e saídas da ferramenta de corte sobre a peça foi o fator de maior relevância na evolução de desgaste quando mantidos todos os outros parâmetros de corte constantes. O valor do desgaste de flanco é bem próximo de uma ferramenta para a outra ao mudar o comprimento da peça;
- Dentro de cada classe de ferramenta, o desgaste para as peça de maior comprimento foi ligeiramente maior ao final dos ciclos de corte. Durante o ciclo, os desgastes foram considerados estatisticamente iguais em determinados número de passes;
- A ferramenta classe P40 foi mais sensível à mudança no comprimento da peça apresentando comparativamente à classe P20 maior diferença entre o desgaste de flanco de um comprimento para o outro;
- Os mecanismos de desgastes identificados foram o adesivo e o abrasivo;
- O destacamento de material na classe P20 foi maior comparativamente à classe P40, comprovando sua maior dureza;
- As regiões de destacamento de material são maiores no fresamento da peça de maior comprimento, sendo relacionadas com o número de impactos sofridos pela ferramenta;
- As marcas de abrasão são mais pronunciadas na classe P40 confirmando a sua maior susceptibilidade ao desgaste de flanco gerado principalmente por esse mecanismo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUKSHIM, N. A.; MATIVENGA, P. T.; SHEIKH, M. A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p. 782-800, 2006.

ASM HANDBOOK. **Volume 16: Machining**. 9. ed. ASM International, 1989. 1089p.

ASTAKHOV, V.; DAVIM, J.P. Tools (Geometry and Material) and Tool Wear. In: DAVIM, João Paulo. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. 1 ed. New Delhi: Springer-Verlag London Limited, 2008. cap.2. p. 29-57.

BALESTRASSI, P. P. Estatística aplicada – Apostila do Curso PCM 01 – Departamento de Produção – UNIFEI, Itajubá. 2003

BATHIA, S. M.; PANDEY, P. C.; SHAN, H. S. Failure of Cemented Carbide Tools in Intermittent Cutting. **Precision Engineering**, Roorkee, p. 148-152, 1979.

BJURKA, E. **Analyze of insert geometries, wear types and insert life in milling**. 2011. 67f. Master of Science Thesis – Department of Applied Mechanics, Division of material and computational mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg.

BRITO, R. F.; CARVALHO, S. R.; LIMA E SILVA, S. M. M. Experimental investigation of thermal aspects in a cutting tool using COMSOL and inverse problem. **Applied Thermal Engineering**, v.86, p.60-68, jul.2015.

CHAKRAVERTI, G.; PANDEY, P. C.; MEHTA, N. K. Analysis of tool temperature fluctuation in interrupted cutting. **Precision Engineering**, v. 6, n. 2, p. 99-105, abr. 1984.

CHEN, X. Q.; LI, H. Z.; ZENG, H. An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, Nanyang Drive, v.180, p. 296-304, jul.2006.

CHU, C.;DORNFELD, D. Geometric Approaches for Reducing Burr Formation in Planar Milling by Avoiding Tool Exits. **Journal of Manufacturing Processes**, Berkeley, v.7, n.2, p. 182-195, 2005.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Artiber Editora, 2010. 286p.

EL-HOFY, H. A. **Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. 562p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, v.1, 1977, 751p.

FREIRE, J. M. **Tecnologia do corte**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977. 380p.

FRESADORA FERRAMENTEIRA FVF 3000. **Manual de instruções, lista de peças, esquemas elétricos, operação e manutenção**. Camanducaia, 2012. 97p.

GU, J.; BARBER, G.; TUNG, S.; GU, R. Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts. **Wear**, v. 225 – 229, p. 273-284, 1999.

GULARTE, C. B. **Um estudo sobre a submedição em hidrômetros para aplicação no controle de perdas aparentes no sistema de abastecimento de água de Blumenau**. 2005. 138p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Centro Tecnológico Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685**: Tool-life testing with single-point turning tools. Geneva, 1977.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 513**: Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges: Designation of the main groups and groups of application. Geneva, 2004.

KALPAKIJAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing, Engineering & Technology**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2006. 1040p.

KARAGUZEL, U.; BAKKAL, M.; BUDAK, E. Modeling and measurement of cutting temperatures in milling. **CIRP Conference on High Performance Cutting**, Chemnitz, v.46, p. 173-176, 2016.

LI, C.; CHEN, X.; TANG, Y.; LI, L. Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost. **Journal of Cleaner Production**, Chongqing, jul.2016.

LIMA, R. O. C. **Fresamento com ar quente**: uma proposta para minimizar a formação de trincas térmicas em ferramentas de metal duro. 2011. 80f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, 29/07/2011.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. da. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 371p.

MARCONDES, F. O metal duro passado a limpo. **O Mundo da Usinagem**, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.omundodausinagem.com.br/pdf/44.pdf>>. Acesso em: 12/08/2016.

MELO, A. C. A. de. **Estudo das trincas de origem térmica geradas em ferramentas de metal duro durante o fresamento frontal**. 2001. 173f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MELO, A. C. A.; MILAN, J. C. G.; SILVA, M. B.; MACHADO, A. R. Some Observations on Wear and Damages in Cemented Carbide Tools. **Journal of the**

Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v.28, n.3, p. 269-277, 2006.

MONTGOMERY, D. C.; RUNTER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. 2016. 652p.

NIELSEN, M. J.; BONATO, A.; JULIATTO, E. S.; TREVISAN, J.; SACHET, M. A. Experimentação e amostragem combinadas para cálculo do rendimento de parque de medidores de água. In: 21º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa.

OLORTEGUI-YUME, J. A.; KWON, P. Y. Crater Wear Evolution in Multilayer Coated Carbides During Machining Using Confocal Microscopy. **Journal of Manufacturing Processes**, East Lansing, v.9, n.1, p. 47-60, 2007.

PAIVA, A. Aplicação da metodologia de projeto de experimentos ao estudo dos parâmetros de usinagem de um aço SAE/ABNT 52100 utilizando ferramentas cerâmicas mistas. Unifei 2004.

PALMAI, Z. Cutting Temperature in Intermittent Cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 27, n.2, p. 261-274, 1987.

PRENGEL, H. G.; PFOUTS, W. R.; SANTHANAM, A.T. State of the art in hard coatings for carbide cutting tools. **Surface & Coatings Technology**, San Diego, v. 102, p 183-190, 1998.

REZENDE, L. E. A.; SANTOS, S. C.; CRUZ, D. F. Progress analysis of wear in carbides inserts during milling ABNT 4340 steel bars with different lengths. In: 23rd ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2015.

SANDVIK COROMANT. Até que ponto as pastilhas de metal duro são aplicáveis? **O Mundo da Usinagem**, São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.omundodausinagem.com.br/pdf/1.pdf>>. Acesso em: 13/08/2016.

SANDVIK COROMANT. **Manual técnico de usinagem**. São Paulo, 2010. 789p.

SANDVIK COROMANT. Materiais das ferramentas de corte: Metal duro revestido. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide>. Acesso em 13/08/2016.

SANDVIK COROMANT. Ferramentas de corte: Pastilha CoroMill 490 para fresamento. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/Pages/productdetails.aspx?c=490R-08T308M-PL%20%20%20%20%204220>>. Acesso em 13/08/2016.

SANDVIK COROMANT. Ferramentas de corte: Fresa CoroMill 490 para cantos a 90 graus. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=490-040Q16-08M>>. Acesso em 13/08/2016.

SANDVIK COROMANT. **Metalcutting Technical guide**: turning, milling, drilling, boring, toolholding. Sweden, 2005. 617p.

SANDVIK COROMANT. **Modern Metal Cutting**: a practical handbook. Sweden, 1994. 960p.

SANDVIK COROMANT. **Rotating Tools**: milling. Sweden, 2012. 359p.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artiliber, 2007. 246p.

SCHROETER, R. B.; MANGONI, C.; AMORIM, D. G. Simulação computacional das forças de usinagem no fresamento frontal. In: 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2003, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: COBEF, 2003.

SHINOZAKI, N. Thermal Cracks of Carbide Face Milling Cutter. **Bulletin of The Japan Society of Mechanical Engineers**, Tokyo, v.5, n.20, p. 753-764, 1962.

SILVA, E. Q.; POLLI, M. L. Aplicação de ferramenta de metal duro revestido com AlCrN nanoestruturado em processo de fresamento de ferro fundido nodular. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: CONEM, 2010.

SILVA, R. H. L. da. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais**. 2010. 114f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUZA, A. J. de. **Processos de Fabricação por Usinagem Parte 1**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/>>. Acesso em: 13/08/2016.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993. 249p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 326p.

TRENT, E. M.; DEARNLEY, P. A. Wear mechanisms of coated carbide tools. **Metals Technology**, v.9, p. 60-75, feb. 1982.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 446p.

VASILKO, K. **Analytická Teória Trieskového Obrábania**. Bratislava: Presov, 2007. 481p.

WANG, Z. Y.; SAHAY, C.; RAJURKAR, K. P. Tool Temperatures and Crack Development in Milling Cutters. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 36, n.1, o. 129-140, 1996.

WRIGHT, P. K.; BAGCHI, A. Wear Mechanisms that Dominate Tool-Life in Machining. **Journal of Applied Metalworking**, Pittsburgh, v.1, n. 4-15, 1981.