

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

RICHARD GUSTAVO BORGES

ANÁLISE DA INFLUENCIA DO TIPO DE TRAJETÓRIA NO DESGASTE DA
FERRAMENTA NO FRESAMENTO DE AÇO FERRAMENTA

Jaraguá do Sul

2017

RICHARD GUSTAVO BORGES

ANÁLISE DA INFLUENCIA DO TIPO DE TRAJETÓRIA NO DESGASTE DA
FERRAMENTA NO FRESAMENTO DE AÇO FERRAMENTA

Monografia apresentada ao curso de Tecnologia da Fabricação Mecânica do campus Geraldo Werninghaus do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Gil M. P. Chagas
Co-orientador: Prof. Giovanni C. Carlini

Jaraguá do Sul

2017

Borges, Richard Gustavo.

Análise da influência do tipo de trajetória no desgaste da ferramenta no fresamento de aço ferramenta/ Richard Gustavo Borges; orientação de Gil Chagas; coorientação de Giovani Conrado Carlini. – Jaraguá do Sul, SC, 2017.

64p.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul – Rau. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica,

Inclui Referências

1. Usinagem. 2. Fresamento. 3. Trajetória. 4. Aço ferramenta. 5. Fresa de topo I. Chagas, Gil M. P. II. Carlini, Giovani Conrado. III Instituto Federal de Santa Catarina. .IV. Título.

RICHARD GUSTAVO BORGES

ANÁLISE DA INFLUENCIA DO TIPO DE TRAJETÓRIA NO DESGASTE DA
FERRAMENTA NO FRESAMENTO DE AÇO FERRAMENTA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 20 de Dezembro de 2017.

Prof. Dr. Gil M. P. Chagas, (orientador)
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Giovani Conrado Carlini (co-orientador)
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Me. Delcio Luís Demarchi
Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse.

Aos meus pais Carlos e Margaret, à minha vó Dinacir e meu irmão Victor, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos amigos, companheiros de trabalho e estudo, que fizeram parte da minha formação.

A esta instituição de ensino, corpo docente, direção e administração, por proporcionar a oportunidade de desenvolver meus conhecimentos em um ambiente adequado, criativo e amigável.

Agradecimento especial aos professores Giovani Conrado Carlini e Gil M. P. Chagas, pelos ensinamentos, paciência, confiança e persistência no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim um agradecimento a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“ Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista. ”

Aldo Novak

RESUMO

Na área de usinagem por fresamento de aço ferramenta, dentre os processos que o envolvem, os avanços tecnológicos já estudados mantem o principal foco nos parâmetros de corte, tipos de geometrias da ferramenta e estudos da utilização de fluidos refrigerantes. Entre os menos aprofundados, está o estudo da influência da trajetória de usinagem sobre o processo. A fim de ampliar os conhecimentos relacionados ao processo de fresamento, buscou-se com este trabalho identificar a influência do tipo de trajetória de usinagem em relação ao desgaste da ferramenta no fresamento do aço AISI P20. Utilizou-se como ferramenta de corte a fresa de topo inteiriça de metal duro. Os ensaios de fresamento foram realizados com parâmetros fixos de velocidade de avanço (v_f), profundidade de corte axial (a_p), profundidade de corte radial (a_e), velocidade de corte (V_c) e movimento de corte concordante. Definiu-se como corpos de prova uma cavidade com geometria retangular com largura x comprimento x profundidade, respectivamente: 145 x 195 x 3mm, partindo de um bloco bruto com dimensões de 150 x 200 x 50mm, ambas possuindo 85 cm³ de material removido. O equipamento utilizado para o desenvolvimento das amostras foi o centro de usinagem Romi D600. As usinagens foram realizadas utilizando três tipos de trajetórias diferentes fornecidas pelo software EdgeCAM® spiral, waveform e laceform, de modo que se diferenciam principalmente, o método de entrada da ferramenta na peça, a quantidade de eixos movimentando-se simultaneamente e os tempos secundários de usinagem. Após análise dos resultados foi possível afirmar que a trajetória que proporcionou melhor comportamento quanto ao desgaste foi a do tipo spiral, na qual possui como estratégia inicial uma entrada em rampa no centro da região usinada, seguida por uma interpolação linear em formato de espiral.

Palavras-Chave: Usinagem, Fresamento, Trajetória, Aço ferramenta, Fresa de topo.

ABSTRACT

In the area of machining by milling of tool steels, among the processes that involve it, the technological advances already studied keep the main focus on cutting parameters, types of tool geometries and studies of the use of coolant fluids. Among the less detailed ones is the study of the influence of the machining path on the process. In order to increase the knowledge related to the milling process, this work aimed to identify the influence of the type of machining path in relation to the wear of the tool in the milling of AISI P20 steel. The carbide end mill cutter was used as a cutting tool. The milling tests were performed with fixed parameters of feed rate (v_f), axial depth of cut (a_p), radial depth of cut (a_e), cutting speed (V_c) and concordant cutting motion. A cavity with rectangular geometry with width x length x depth, respectively: 145 x 195 x 3mm, was defined as test pieces, starting from a rough block with dimensions of 150 x 200 x 50mm, both having 85 cm³ of material removed. The equipment used for the development of samples was the Romi D600 machining. The cutting was performed using three different types of toolpaths provided by software EdgeCAM® spiral, waveform and laceform, so that the tool input method, the number of shafts moving simultaneously and the machining. After analyzing the results, it was possible to affirm that the trajectory that provided the best wear behavior was the spiral type, in which the initial strategy was a ramp entry in the center of the machined region, followed by a linear spiral interpolation.

Keywords: Cutting, Milling, Trajectory, Tool steel, End mill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplificação de fresamento horizontal.....	25
Figura 2 - Exemplificação de fresamento tangencial e frontal respectivamente.....	26
Figura 3 - Ilustração de movimento concordante e discordante.....	27
Figura 4 - Propriedades da ferramenta de corte.....	33
Figura 5 - Classificação dos tipos de metal-duro.....	35
Figura 6 - Seção de corte ilustrando o cavaco produzido por classes diferentes de metal-duro. Temperaturas em graus Celsius.....	36
Figura 7 - Grandezas do desgaste da ferramenta.....	38
Figura 8 - Mecanismos de desgaste na ferramenta.....	39
Figura 9 - Lascamento do gume.....	41
Figura 10 - Desgaste no flanco.....	41
Figura 11 - Desgaste na face (cratera).....	42
Figura 12 - Fluxograma de desenvolvimento metodológico.....	43
Figura 13 - Trajetória Laceform.....	45
Figura 14 Trajetória Waveform.....	45
Figura 15 - Trajetória Spiral.....	46
Figura 16 - Foto do centro de usinagem utilizado nos ensaios.....	46
Figura 17 - Foto do método de fixação da amostra e da ferramenta.....	47
Figura 18 - Desenho detalhado da fresa utilizada e fotografia desta, respectivamente.....	47
Figura 19 - Microscópio Estereoscópio Carl Zeiss modelo Stemi 4000t e suporte desenvolvido para medições.....	48
Figura 20 - Fotografia da ligação e do equipamento analisador de qualidade de energia Fluke434 II.....	49
Figura 21 - Gráfico de desgastes de flanco $VB_{máx}$ para as três trajetórias avaliadas.....	51
Figura 22 - Curvas de desgaste de flanco $VB_{máx}$ para três estratégias de usinagem.....	52
Figura 23 - Fotografia da fresa após o primeiro passe na trajetória laceform.....	53
Figura 24 – Desgaste de flanco máximo $VB_{máx}$: (a) volume de material removido de 85 cm ³ , (b) volume de material removido de 170 cm ³ , (c) volume de material removido de 250 cm ³	54
Figura 25 - Gráfico de consumo de potência elétrica aparente para as três trajetórias avaliadas.....	55

Figura 26 - Gráficos de leitura do analisador de qualidade de energia.	56
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeito dos elementos de liga nas características do aço.	22
Tabela 2 - Principais aços utilizados em cavidades, seus equivalentes, sua composição e dureza de utilização.	23
Tabela 3 - Propriedades de aços e aplicações típicas.	24
Tabela 4 - Composição química nominal % do aço AISI P20.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNC – Comando numérico computadorizado

ISO - Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization)

AISI – Instituto Americano de Ferro e Aço (American Iron and Steel Institute)

LISTA DE SÍMBOLOS

Vf	Mm	Velocidade de avanço
ap	Mm	Profundidade de corte
ae	Mm	Profundidade de corte radial
Vc	mm/min	Velocidade de corte
Fz	mm/gume	Avanço por gume
µm		milésimo de milímetro
mm		milímetro
N		Newton
kW		kilo Watts
CV		Cavalos de potência
C		Carbono
Si		Silício
S		Enxofre
P		Fósforo
Cr		Cromo
Ni		Níquel
Mn		Manganês
Co		Cobalto
Mo		Molibdênio
V		Vanádio
W		Tungstênio
Cu		Cobre
Ti		Titânio
F_c	N	Força de corte
F_f	N	Força de avanço
F_{ap}	N	Força de apoio
F_e	N	Força efetiva de corte
F_p	N	Força passiva
F_{TR}	N	Força ativa
F_n	N	Força de compressão
P_f	kW	Potência de avanço

P_c

kW

Potência de corte

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Objetivo geral	19
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
2 DESENVOLVIMENTO	20
2.1 Aço ferramenta	20
2.1.1 Características necessárias dos materiais para machos/cavidade.....	20
2.1.2 Aços para cavidades/machos moldantes.....	22
2.2 Fresamento	24
2.2.1 Tipos fundamentais de fresamento	25
2.2.2 Movimentos do processo	26
2.2.4 Potência no fresamento.....	30
2.3 Estratégias de fresamento de cavidades.....	32
2.4 Materiais para ferramenta de corte	33
2.4.1 Metal duro	34
2.4.2.1 Classificação de ferramentas em metal duro	35
2.5 Coberturas.....	36
2.6 Desgaste da ferramenta.....	37
2.6.1 Mecanismo de desgaste	38
2.6.1.1 Adesão	39
2.6.1.2 Difusão	39
2.6.1.3 Oxidação.....	40
2.6.1.4 Abrasão mecânica.....	40
2.6.2 Tipos de desgaste na ferramenta.....	40
2.6.2.1 Lascamento do gume.....	40
2.6.2.2 Desgaste de flanco (VB).....	41
2.6.2.3 Desgaste na face (superfície de saída).....	41
3 METODOLOGIA.....	43
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
4.1 Resultados dos experimentos	51
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
5.1 Conclusão	58

5.2 Sugestões para trabalhos futuros	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A economia mundial vem sofrendo constantes mudanças, relacionadas aos avanços tecnológicos visando o aumento da produtividade e redução de custos de fabricação. Nesse contexto um dos pontos de grande importância é a otimização de processo, que visa o emprego de técnicas e seleções das melhores alternativas, com o propósito de alcançar os objetivos determinados, com menor custo e em tempo reduzido objetivando um mercado ainda mais competitivo. Neste cenário, a confecção de moldes e matrizes para injeção de plásticos ganha cada vez mais espaço, devido à possibilidade de produção de componentes seriados, com alto grau de confiabilidade e baixos prazos de entrega (HELLENO; SCHUTZER, 2004).

A usinagem representa papel fundamental nos processos de fabricação dos mais variados ramos da indústria mecânica. Dentre os diversos processos de usinagem, o fresamento constitui um dos mais importantes pela sua produtividade e flexibilidade (Groover, 2002).

O processo de usinagem por fresamento é amplamente utilizado em diversos setores da indústria, tais como, agrícola, automotiva, metalurgia, entre outras. Os avanços tecnológicos obtidos no desenvolvimento de máquinas ferramenta e ferramentas de corte tornam o fresamento cada vez mais utilizado devido a sua versatilidade. (Groover, 2002).

Durante o fresamento, a ferramenta de corte é submetida a um esforço intenso devido ao corte do tipo interrompido, que causa fortes impactos. Esses esforços tendem a gerar desgastes e avarias de origem mecânica na fresa, que frequentemente causam problemas como lascamento, trincamento ou quebras (Santos e Sales, 2007).

Para melhorar o desempenho de uma fresa submetida ao processo de fresamento é importante conhecer e avaliar os mecanismos de desgastes e avarias que ocorrem durante o processo (Machado et al., 2009). Dessa forma, é possível selecionar uma classe de material adequada para reduzir o efeito desse desgaste ou avaria. Normalmente, para os problemas do tipo avarias, como lascamento ou quebra, podem ser selecionadas classes de materiais mais tenazes, bem como ferramentas com geometria positiva e adequação dos parâmetros de corte, como, por exemplo, a redução do avanço. Para problemas como desgaste excessivo, a solução pode ser aumentar a classe de dureza do material, avaliar outro tipo de revestimento ou alterar os parâmetros de corte (Sandvik, 2005).

Outra possibilidade de melhorar o desempenho quanto ao desgaste é atuar na estratégia de entrada, de saída, bem como nas trajetórias da ferramenta durante o fresamento. Dentro desse conceito foram realizados alguns trabalhos como Ibaraki, Yamaji e Matsubara (2010), que avaliaram o desgaste no fresamento considerando movimento da fresa do tipo trocoidal, Salehi

et al. (2016) compararam o desempenho das trajetórias epicicloidal e trocoidal quanto aos tempos de usinagem, a força de corte e a vibração na ferramenta. Os resultados desses trabalhos mostraram uma tendência de redução do desgaste quando são utilizadas trajetórias com movimentos do tipo trocoidal.

O presente trabalho apresenta uma avaliação do desgaste de flanco em fresas de topo de metal duro inteiriças considerando três diferentes estratégias de trajetória da ferramenta, geradas no software EdgeCam®, e aplicadas no fresamento de um aço ferramenta AISI P20.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Identificar a trajetória de usinagem que promova o menor desgaste da ferramenta, através do processo de usinagem por fresamento CNC, na abertura de cavidades utilizando como matéria prima o aço AISI P20 e como ferramenta uma fresa de topo inteiriça em metal duro.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar o desgaste de flanco durante o fresamento com diferentes trajetórias;
- b) Medir o desgaste de flanco (VB) para cada trajetória;
- c) Avaliar o tempo de usinagem no fresamento com diferentes trajetórias;
- d) Verificar o consumo médio de potência elétrica para cada trajetória;
- e) Realizar o comparativo gráfico dos experimentos;

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Aço ferramenta

Os componentes do molde devem ser constituídos de materiais que garantam determinadas características de acordo com as condições que tais peças serão submetidas durante o processo, pois, é na cavidade do molde que o polímero fundido será injetado a elevadas pressões, para fluir através dos canais de alimentação e preencher os espaços vazios desta, a fim de adquirir o formato desejado. Durante esta etapa, a parte fixa é muito aquecida, sendo então necessária a refrigeração, tanto do molde como do componente injetado, através de fluido refrigerante pelos canais de refrigeração (POUZADA, 2003).

2.1.1 Características necessárias dos materiais para machos/cavidade

Segundo Menges (2000) e Cracknell (1993), entre as principais propriedades a serem consideradas para aplicação de aços utilizados em cavidades e machos de moldes de injeção, estão:

- a) Fabricação econômica (usinabilidade, fácil remoção por eletro-erosão e polibilidade);
- b) Capacidade de ser tratado termicamente;
- c) Rigidez e resistência suficientes;
- d) Alta condutividade térmica;
- e) Resistência à corrosão;
- f) Estabilidade dimensional.

A usinabilidade é definida por Rees (1995) como a aptidão que o material tem para ser processado com uma ferramenta de corte. Essa propriedade é relevante em aços utilizados em cavidades por estas serem os componentes de maior complexidade do molde, onde as tolerâncias dimensionais dos detalhes a serem usinados são maiores. Portanto, é possível afirmar que esta característica é uma grandeza com influência determinante na produtividade.

A polibilidade é a facilidade com que se consegue polir o aço, sendo este aspecto muito importante para a qualidade superficial do produto final, dando a qualquer superfície um acabamento espelhado. Esta qualidade é necessária nos moldes para a produção de faróis e lanternas da indústria automotiva, e também para a linha de eletrodomésticos. Além disso, uma superfície polida apresenta maior resistência à corrosão, devido à camada superficial de

proteção que é criada pelo polimento, impedindo assim a ação de ácidos, de certos sais químicos, oxidação, entre outros (MENGES, 2000).

No aço, a resistência ao desgaste é diretamente associada à dureza da superfície, sendo esta característica ligada à vida útil do molde, que pode chegar a milhares de ciclos (HARADA, 2004).

Deve-se pensar também, na necessidade de tratamento térmico de algumas peças, para elevar a dureza ou aumentar a resistência mecânica, pois alguns aços aceitam determinados tratamentos térmicos, e isso, pode limitar ou reduzir a variedade aplicável deste metal (HARADA, 2004).

Neste aspecto, de acordo com Cracknell (1993), a estabilidade dimensional é um dos principais atributos de um material, devido à natureza cíclica do processo de injeção, pois expõem os materiais do molde a níveis consideráveis de tensões, variações de temperatura e deformações elásticas. Por isso, o material ideal para fabricação de molde deve possuir resistência e durabilidade suficientes para resistir a deformações permanentes, mas ductilidade suficiente para resistir à quebra e a cargas de impacto.

A troca de calor entre a peça que está se solidificando e o molde, tem um efeito considerável no custo final do produto, pois, esta transferência de calor é influenciada pela condutividade térmica do material da cavidade e pelos elementos de liga, os quais dão margem para o aumento da variação da condutividade térmica (HARADA, 2004). No processo de injeção, o molde é constantemente aquecido e resfriado durante o ciclo de injeção, e por conta disto, quanto maior a condutividade térmica do aço selecionado, melhor será do produto moldado (MENGES, 2000).

Todas estas características citadas variam de acordo com o material, pois, cada um é composto por determinados elementos de liga resultantes de seu processo de fabricação (ROSATO & ROSATO, 1995). Para Cracknell (1993), o termo "aço liga" descreve um aço que contém outros elementos de liga adicionados ao carbono, os quais são empregados para modificar intencionalmente suas propriedades. Os elementos de liga, de acordo com a quantidade empregada, podem ter efeitos tanto positivos como negativos nas características desejadas. Na Tabela 1 é possível observar o efeito dos elementos de liga nas características do aço.

Tabela 1 - Efeito dos elementos de liga nas características do aço.

Propriedade	Elementos de liga												
	C	Si	S	P	Cr	Ni	Mn	Co	Mo	V	W	Cu	Ti
Rigidez	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	•	↓
Resistência ao impacto	↓	↓	↓	↓	↓	•	•	•	•	•	•	•	•
Resistência ao desgaste	↑	•	•	•	↑	•	↑	•	↑	↑	↑	•	↑
Endurecimento	•	↑	•	•	↑	↑	↑	•	↑	•	•	•	•
Dureza	↑	↑	•	•	↑	↑	•	↑	↑	↑	↑	•	•
Usinabilidade	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	•	•	↓	↓	•	•
Ductilidade	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	•	•	↓	•	•
Resistência ao calor	↑	↑	•	↑	↑	•	•	↑	↑	↑	↑	•	•
Retenção de dureza	↑	↑	•	↑	↓	•	↑	↑	↑	↑	↑	•	•
Resistência à corrosão	•	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	•

Fonte: Adaptado de (MENGES, 2000)

Analisando a tabela 1, percebe-se que o S e o Ti podem diminuir a rigidez do material, assim como todos os outros elementos de liga, exceto o Ni. Somente o S eleva a usinabilidade de um material. A elevada presença de Cr dificulta a retenção de dureza por um material, bem como o S prejudica a resistência à corrosão e apenas o Ni eleva a ductilidade. Nenhum elemento aumenta a resistência ao impacto, mas também nenhum elemento diminui a resistência ao desgaste, o endurecimento, a dureza e a resistência ao calor. Apenas alguns elementos elevam estas propriedades (MENGES, 2000).

De acordo com Menges (2000), o aço é o único material que garante as propriedades citadas anteriormente, gerando assim, confiabilidade no funcionamento do molde em longas vidas úteis. Para tanto, alguns aços têm sido modificados a fim de desenvolver uma estrutura que garanta as propriedades necessárias para o uso.

2.1.2 Aços para cavidades/machos moldantes

Com base nas propriedades citadas anteriormente, os aços empregados em cavidades e machos variam de acordo com os requerimentos de produtividade, complexidade de fabricação, tamanho do molde, esforços mecânicos e natureza abrasiva ou corrosiva da resina termoplástica.

Segundo Menges, (2000) e Harada, (2004), os principais aços utilizados em cavidades são, o AISI P20, AISI 4340, AISI H-13 e AISI 420, conforme demonstra a Tabela 2, a qual também cita alguns aços de outras nomenclaturas (que remetem ao fabricante), que se

equivalem aos citados na primeira coluna em relação à composição e as propriedades.

Tabela 2 - Principais aços utilizados em cavidades, seus equivalentes, sua composição e dureza de utilização.

Aço	Composição (%)	Equivalência	Dureza de utilização (HRc)
AISI P20	0,35C; 0,80 Mn; 0,50N Si; 0,45 Mo; 1,70 Cr	SAE ² -2738; SAE-2311; VP 20 IM; M200; THYROPLAST 2311	Utilizado no estado de fornecimento, pré beneficiado com durezas de 28/32.
AISI 4340	0,40 C; 0,70 Mn; 0,30 Si; 1,80 Ni; 0,80 Cr; 0,25 Mo; 0,04 S	VM 40 (Villares); 4340 (Gerdau)	Utilizado no estado pré-beneficiado com durezas de 28/32.
AISI H-13	0,35 C; 0,40 Mn; 1,00 Si; 1,40 Mo; 5,0 Cr; 1,00 V	VH 13 IM; W302; THYROTHERM 2344	Utilizado no estado temperado com dureza de 50/52.
AISI 420	> 0,15 C; 1,00 Mn; 1,00 Si; 12,00-14,00 Cr	VC-150; VP 420 IM; M310; THYROPLAST 2083	Utilizado no estado temperado com dureza de 50/52.

Fonte: Adaptada de (HARADA, 2004; MENGES, 2000).

Segundo Menges, (2000) e Harada, (2004), os aços citados na tabela 2 são os mais utilizados em cavidades, devido não só às suas propriedades em termos gerais, mas sim devido à um conjunto de fatores, como disponibilidade no mercado e custo acessível.

Esses materiais representam classes distintas, diferenciadas por características, composição, propriedades, custo e utilização. O AISI 4340 pertence à a classe dos aços carbono de baixa liga e baixo custo; o AISI P20 caracteriza os aços ferramenta específicos para moldes plásticos, e de alta polibilidade; o AISI H-13 representa os aços ferramenta para trabalho a quente, endurecíveis por têmpera; e o AISI 420 os aços inoxidáveis martensíticos, também de alta polibilidade e endurecíveis por têmpera. Apesar de o AISI P-20 e AISI H-13 pertencerem a classes distintas, possuem diferenças de composição e de durezas, além de se diferenciarem pela necessidade de tratamento térmico (o aço P-20 pode ser utilizado sem tratamento), eles podem aparecer juntos, por corresponder a uma gama de aços largamente utilizada, e possuir propriedades muito boas, além de custo razoável (HARADA, 2004).

A tabela 3 apresenta uma comparação das propriedades de alguns aços e exemplos de aplicações típicas de cada um.

Tabela 3 - Propriedades de aços e aplicações típicas.

Aços	Propriedades								Aplicações típicas
	Resistência ao desgaste	Rigidez	Endurecimento à quente	Resistência à corrosão	Condutividade térmica	Usinabilidade	Polibidade	Soldabilidade	
AISI 4340	R	MB	R	P	B	B	B	P	Aço de baixo custo, p/ moldes grandes, mas não adequado p/ alta qualidade final.
AISI P20	R	E	R	R	B	B	MB	R	Excelente balanceamento de propriedades para moldes de injeção de qualquer tamanho, e materiais não abrasivos.
AISI 01 ou VND (Villares)	MB	R	B	P	B	MB	MB	P	Alcança dureza maior que 56 HRC, podendo ser utilizado em insertos e componente c/ maior solicitação de atrito.
AISI H13	B	MB	MB	P	P	E	MB	B	Usado na maioria dos moldes p/ injeção de resinas c/ fibras minerais ou de vidro, e em moldes com acabamento fino ou não clorados.
AISI A2	E	P	MB	P	P	MB	MB	P	Idem AISI 01 ou VND, Moldes pequenos.
AISI D2	E	P	MB	P	P	P	B	P	Endurecido a ar (54-56 HRC) permite maior resistência a abrasão, podendo ser utilizado como inserto em áreas de grande desgaste (canais de injeção). Para peças pequenas.
AISI 420	B	B	MB	MB	P	MB	E	B	Aplicações similares. Muito utilizado quando resistência á corrosão é necessária.
AISI M2	E	E	E	P	P	P	B	P	Para pequenos insertos, pinos e lâminas extratoras.

*P=Pobre; R=Regular; B=Bom; MB=Muito Bom; E=Excelente

Fonte: Adaptada de (REES, 1995).

No caso do processamento de injeção utilizando um polímero reforçado com fibra de vidro, em que não se necessite alta precisão no molde, ou seja, a peça não é técnica, e a produtividade é baixa, pode-se utilizar um aço mais comum, como o AISI 4340 e AISI 420. Portanto, se a produtividade for média ou alta, recomenda-se serem utilizados somente o P20 ou o H-13 (REES, 1995).

2.2 Fresamento

O fresamento é o processo de usinagem cujo o movimento de corte decorre da rotação da ferramenta (fresa) em seu próprio eixo. O movimento de avanço geralmente provém do deslocamento da peça fixa na mesa da máquina, garantindo o contato entre peça e ferramenta em rotação, a fim de promover a forma e dimensões desejadas através da remoção de material em forma de cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Machado et al. (2009) destaca

que em casos especiais, a peça pode se manter estática e apenas a ferramenta realiza os movimentos inerentes ao processo, avanço e corte.

Segundo Machado et al. (2009) o fresamento recebe caráter de importância principalmente por sua versatilidade, em relação a diversas possibilidades de geometrias e complexidade de peças produzidas por este processo, além de proporcionar elevadas taxas de remoção de material devido a presença de múltiplas arestas cortantes na ferramenta, tal característica que proporciona inclusive bom acabamento superficial, quando utilizados parâmetros adequados para esse fim.

Segundo Costa (2003), o bom acabamento, a produtividade elevada e a possibilidade da utilização de parâmetros que consideram altas velocidades de avanço, são decorrentes da ferramenta possuir diversas arestas cortantes, proporcionando um pequeno avanço por dente (fz).

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) para a fabricação de algumas peças com superfícies planas ou não, o fresamento é considerado o processo que melhor se aplica.

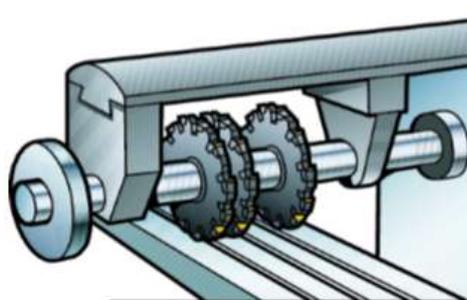
2.2.1 Tipos fundamentais de fresamento

Entre os processos de fabricação, a usinagem é uma das etapas mais importantes e, dentre suas operações, o fresamento é o mais utilizado na indústria de manufatura (MURTHY e RAJENDRAN, 2010), o qual pode ser dividido em dois grandes grupos, tipo de fresamento segundo a posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta, e segundo a disposição dos dentes ativos da ferramenta.

Dentre os que pertencem ao primeiro grupo estão, o fresamento horizontal, conforme a

Figura 1. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 1 - Exemplificação de fresamento horizontal.



Fonte: Sandvik, 2017.

O segundo grupo classifica-se conforme as seguintes operações descritas por Diniz, Marcondes e Coppini (2013):

- Fresamento Tangencial: é aquele no qual o eixo da fresa fica paralelo a superfície que está sendo gerada, desde que os dentes ativos da ferramenta estejam na superfície cilíndrica da ferramenta. As ferramentas utilizadas neste tipo de operação são conhecidas como fresas cilíndricas e tangenciais.

- Fresamento frontal: é aquele no qual a fresa fica perpendicular à superfície que está sendo usinada e os dentes ativos ficam na superfície frontal da ferramenta. As ferramentas utilizadas neste tipo de operação são conhecidas como fresas frontais ou de topo

Além destas classificações de fresamento existem vários tipos de fresas para diversos tipos de geometria a serem usinados, os quais podem combinar ou não as classificações já citadas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 2 - Exemplificação de fresamento tangencial e frontal respectivamente.



Fonte: Sandvik, 2017.

2.2.2 Movimentos do processo

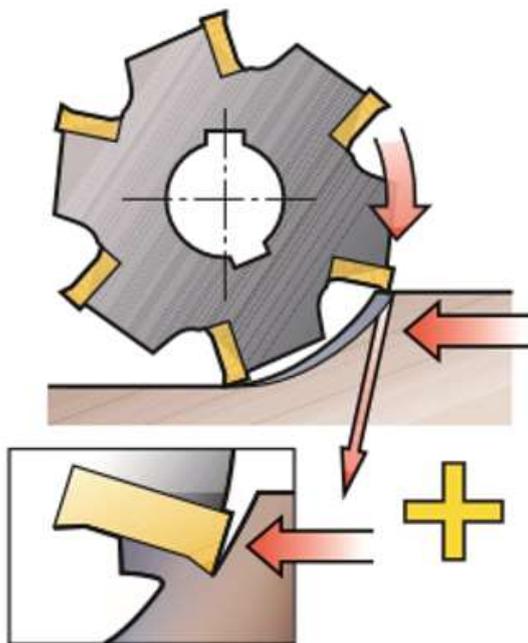
A estratégia de usinagem tem uma influência significativa sobre o processo fresamento (NG et al., 2000). A escolha adequada da estratégia de corte é importante para alcançar a qualidade superficial desejada (TOH, 2006). No fresamento, as estratégias de usinagem podem ser identificadas de acordo com as direções de corte e de avanço, ou em função da trajetória da ferramenta. Dentre os que são identificados pelas direções de corte e de avanço estão, o fresamento concordante ou para baixo e o fresamento discordante ou para cima.

No fresamento concordante (climb milling, down milling), os movimentos de corte da

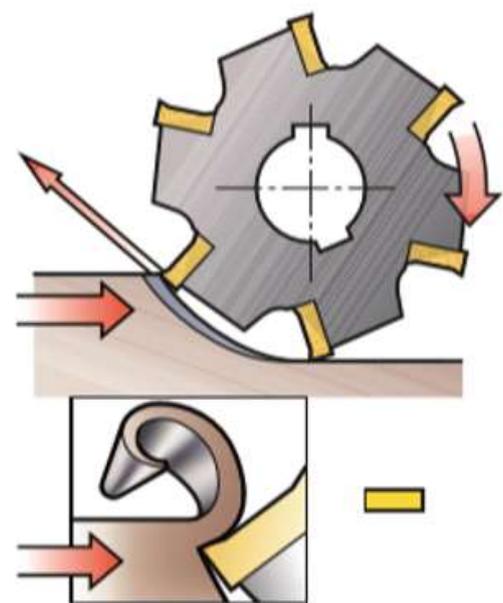
ferramenta e de avanço da peça seguem o mesmo sentido, iniciando o corte com a espessura máxima do cavaco. Já no fresamento discordante (conventional milling, up milling), o movimento de corte e de avanço possuem sentidos opostos, desse modo o corte inicia com a espessura mínima do cavaco (STEMMER, 1995). A Figura 1 e a Figura 3 ilustram as estratégias concordante e discordante.

Figura 3 - Ilustração de movimento concordante e discordante.

Concordante



Discordante



Fonte: Sandvik, 2017.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os movimentos relacionados ao processo de usinagem, por convenção, aqueles em que se supõe que a peça está parada e todo o movimento é realizado pela ferramenta, afim de padronizar sinais algébricos e facilitar estudos de movimentos de ferramentas com geometrias de corte complexas. Tendo sempre como referência então a peça. Ainda segundo tais os autores, os movimentos podem ser classificados como ativos ou passivos.

Os movimentos ativos são aqueles que promovem a remoção de material, sendo estes, movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo de corte. Já nos movimentos passivos não ocorre esta remoção, sendo estes, movimento de ajuste, movimento de correção, movimento de aproximação e movimento de recuo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Todos os movimentos citados anteriormente são de suma importância ao processo, pois cada

um resulta em um tempo de operação, e ao soma-los, resultam no tempo total de fabricação ou produção.

Segundo Rigatti (2010), no movimento concordante são corrigidos alguns dos problemas presentes na utilização do movimento discordante, pois o componente da força vertical de usinagem tende a empurrar a peça em direção a fixação da peça. Outro fator de influência é a espessura do cavaco, que para o movimento concordante é máxima no início do corte (hm_{\max}), decrescendo até chegar a zero, fazendo com que o atrito gerado na entrada da ferramenta seja maior do que no movimento discordante, porém, a saída da usinagem tende a ser mais suave. Entretanto a entrada da aresta cortante no movimento concordante acontece em condições desfavoráveis que podem diminuir a vida útil da ferramenta, pois o material da peça pode apresentar uma superfície endurecida, seja ela por tratamento térmico, crosta de fundição ou forjamento, por exemplo (FERRARESI, 1970).

Já no movimento discordante a espessura do cavaco aumenta progressivamente de zero a um valor máximo (hm_{\max}), devido a interação dos movimentos de corte e avanço que realiza a retirada de material. O grande atrito gerado desde a entrada da ferramenta na peça, até esta possuir capacidade de superar o valor da tensão de ruptura do material pela variação da força vertical do início do corte, tende a afastar a ferramenta da peça a empurrando contra a mesa da máquina e no fim arrancando-a da mesa. Portanto este tipo de movimento provoca vibrações e desgaste excessivo da ferramenta, além de prejudicar a superfície acabada e as dimensões da peça em alguns casos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.2.3 Forças e grandezas envolvidas no fresamento

Para realização dos cálculos que estimam as forças relacionadas ao processo de usinagem considera-se alguns fatores, como, metalúrgicos, químicos, geométricos e térmicos encontrados durante a remoção do material (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2013).

Os fatores metalúrgicos correspondem à dureza e resistência do material, que determinam as forças que atuam sobre a ferramenta de corte e o atrito entre a ferramenta e a peça. Os fatores geométricos são principalmente: os ângulos da ferramenta de corte, a posição da ferramenta em relação à peça e a seção transversal do cavaco. Já os fatores químicos consideram-se os fenômenos de adesão molecular e de difusão, que são responsáveis pela formação de arestas postiças e desgaste da ferramenta. Os fatores térmicos estão diretamente ligados ao atrito entre peça, ferramenta e cavaco, e também ao processo de deformação plástica do material a ser removido (COELHO et al., 2003).

Segundo Machado et al. (2009) o conhecimento das forças que agem sobre o processo de usinagem são de extrema importância, pois através desse conhecimento é possível estimar outras características presentes. Diniz, Marcondes e Coppini (2013), destacam como características afetadas pela força de usinagem, a potência de corte (que corresponde a potência necessária do cabeçote da máquina-ferramenta para realizar o corte), a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta.

O autor ainda descreve a decomposição da força de usinagem (F_u) segundo a norma DIN 6584, que a identifica como sendo decomposta de duas outras forças, as quais tem um componente relacionado ao plano de trabalho, denominado Força ativa (F_t), e um e a componente correspondente perpendicular ao plano de trabalho, denominado Força passiva (F_p).

- a) A força ativa pode ser desmembrada em outras importantes forças que contribuem na potência de usinagem, sendo estas: (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2013).
- b) Força de corte (F_c): Projeção de (F_u) sobre a direção de corte.
- c) Força de avanço (F_f): Projeção de (F_u) sobre direção de avanço.
- d) Força de apoio (F_{ap}): Projeção de (F_u) sobre uma direção perpendicular à direção de avanço.
- e) Força efetiva de corte (F_e): Projeção de F_u sobre a direção efetiva de corte.

Desta forma após a obtenção da Força ativa, o outro componente que corresponde diretamente ao valor F_u é a força passiva que não implica diretamente no valor da potência de usinagem, pois seus valores decorrem de movimentos perpendiculares ao plano de trabalho. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), este componente implica diretamente na deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte, se tornando responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e dimensões apertadas. Portanto os autores definem a força de usinagem como a relação entre força passiva e ativa através da equação:

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

Já Machado et al. (2009) destaca os três componentes básicos da força de usinagem (F_u) como:

- a) Força de corte ou força principal de corte (F_c): Projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte.

- b) Força de avanço (F_f): Projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço.
- c) Força passiva ou força de profundidade (F_p): Projeção de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.
- d) O autor ainda identifica como outros importantes componentes:
- e) Força ativa (F_{TR}): Projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho.
- f) Força de compressão (F_n): Projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte.

Dessa forma como a força de usinagem é decomposta em três principais componentes considera-se a equação:

$$F_u = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

Entretanto, nestes modelos não são consideradas as constantes alterações do contato da ferramenta com a peça ocorrentes normalmente no fresamento de formas complexas, e também a influência do centro da ferramenta no momento do corte, fato que resulta em alterações da força de usinagem, como documentado por SOUZA et al. (2010). Segundo SOUZA et al. (2010), modificações do contato ferramenta-peça são responsáveis pelas alterações das componentes cartesianas da força de usinagem, apresentando variação superiores a 150% nos valores das forças. BERKENBROCK (2012) revela alterações significativas nos componentes da força de usinagem em função do sentido e direção de corte, sendo ascendente e descendente ou concordante e discordante. Situações típicas no fresamento de formas complexas.

2.2.4 Potência no fresamento

De acordo com Machado et al. (2009), somente os componentes de avanço e corte que contribuem para a potência de usinagem. Na equação a seguir, as unidades de medida para força de avanço (F_f) é dada em [N] e de velocidade de avanço (V_f) em [mm/min]. A Potência de avanço (P_f) é dada por:

$$P_f = \frac{F_f * V_f}{6,0 * 10^4} \quad [\text{kW}] \quad (3)$$

Já na equação a seguir, a unidade de medida velocidade de corte (V_c) em [m/min]. A Potência de corte (P_c) é dada por:

$$P_c = \frac{F_c * V_c}{6,0 * 10^4} \quad [\text{kW}] \quad (4)$$

Caso seja necessário expressar o valor da potência em [CV] dividem-se os valores obtidos por 0,735.

A potência necessária de cada motor responsável pelo acionamento de cada movimento é resultante dos valores encontrados nas equações 3 e 4, dividida pelo fator de eficiência do equipamento (η). Seguindo a equação a seguir.

$$P_{mc} = \frac{P_c}{\eta_c} \quad [\text{kW}] \quad (5)$$

$$P_{mf} = \frac{P_f}{\eta_f} \quad [\text{kW}] \quad (6)$$

Onde P_{mc} e P_{mf} correspondem a potência necessárias dos motores dos acionamentos do eixo árvore e do carro responsável pelo movimento de avanço. Já os valores de η_f e η_c correspondem aos valores de eficiência do sistema de transmissão.

Segundo DINIZ; MARCONDES; COPPINI (2013), para máquinas CNC o valor de eficiência pode ser maior que 90%, pois a variação de rotação e a transmissão dos movimentos do motor é realizada com poucos elementos de transmissão diferentemente das máquinas convencionais onde o rendimento varia de 60 a 80%.

2.3 Estratégias de fresamento de cavidades

Segundo Souza (2004), dentre os processos de abertura de cavidades através do fresamento existem diferentes etapas no processo de desenvolvimento da geometria, que são:

- a) Desbaste;
- b) Alívio de cantos e pré-acabamento;
- c) Acabamento por fresamento;
- d) Operações manuais de acabamento.

O autor ainda define o desbaste como, sendo o início do processo, partindo do material bruto realizando a usinagem em níveis, dos quais se denomina, usinagem em 2 ½ eixos, devido ao movimento da ferramenta em relação a altura no passe vertical e em seguida a trajetória é realizada nos dois outros eixos, simultânea ou individualmente, removendo material.

A usinagem de cavidades por fresamento pode ser realizada através de diversas estratégias de usinagem, definidas através da escolha de parâmetros, ferramentas e trajetórias. A trajetória tem como base o tipo de entrada da ferramenta na peça em seguida seu caminho para remoção de cavaco. O tempo de corte, esforços envolvidos e acabamento da superfície, além do desgaste da ferramenta e potência consumida pela máquina são alguns dos fatores levados em consideração na escolha da estratégia que melhor se aplica a geometria a ser realizada.

(VENTURA, 2010).

Afim de melhorar o desempenho quanto ao desgaste e atuar na estratégia de entrada, de saída, bem como nas trajetórias da ferramenta durante o fresamento. Dentro desse conceito alguns autores como Ibaraki, Yamaji e Matsubara (2010) avaliaram o desgaste no fresamento considerando movimento da fresa do tipo trocoidal.

Salehi et al. (2016) compararam o desempenho das trajetórias epicicloidal e trocoidal quanto aos tempos de usinagem, a força de corte e a vibração na ferramenta, já Gonzalez e Ferreira (2015) criaram um sistema para geração de trajetórias trocoidais e espirais para o fresamento de cavidades 2,5d com múltiplas ferramentas e avaliaram o desgaste em um aço AISI P20. Pleta, Ulutam e Mears (2015) avaliaram dois tipos de trajetórias no fresamento de uma liga a base de níquel, uma que utiliza movimentos do tipo trocoidal e outra trajetória denominada de movimento padrão. Os resultados desses trabalhos mostraram uma tendência de redução do desgaste quando são utilizadas trajetórias com movimentos do tipo trocoidal.

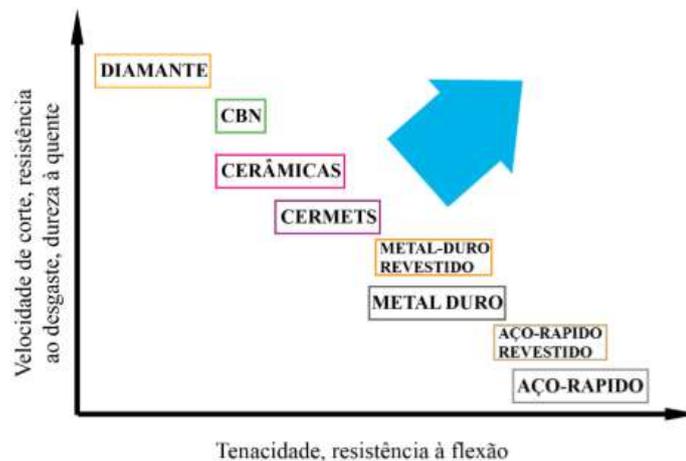
2.4 Materiais para ferramenta de corte

O material da ferramenta de corte deve possuir certas propriedades. Entretanto, nenhuma ferramenta possui todas as propriedades, devendo assim ser selecionado o tipo e material da ferramenta de acordo com a aplicação necessária ao processo (KÖNIG, 1997). Tais propriedades são:

- a) Resistência à compressão;
- b) Dureza;
- c) Resistência à flexão e tenacidade;
- d) Resistência do gume;
- e) Resistência interna de ligação;
- f) Resistência a quente;
- g) Resistência à oxidação;
- h) Pequena tendência à difusão e caldeamento;
- i) Resistência à abrasão;
- j) Condutibilidade térmica;
- k) Calor específico e expansão térmica adequada.

Na Figura 4, são apresentadas as propriedades dos materiais de ferramentas mais importantes quanto à dureza, resistência à flexão, vida da útil e tenacidade.

Figura 4 - Propriedades da ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de (KÖNIG, 1997)

Como o material de ferramenta usada neste trabalho é o metal duro, nas próximas seções será dado a este material um maior detalhamento.

2.4.1 Metal duro

É considerado como o mais importante material para ferramentas utilizado na indústria de manufatura devido à combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade. Este tipo de material apresenta uma grande variedade de tipos, diferenciados pela adição de diversos elementos de liga e também de diversos revestimentos, o que possibilita a obtenção de propriedades necessárias às diferentes condições de usinagem.

Metais duros são materiais compostos, constituídos de um ligante metálico dúctil (cobalto ou níquel) e de carbonetos dos metais de transição (W, Ti, Ta, Nb, etc.) embutidos no ligante (KÖNIG, 1997). As vantagens dos metais duros são:

- a) Boa estrutura cristalina;
- b) Dureza elevada;
- c) Resistência à compressão;
- d) Resistência ao desgaste a quente;
- e) Metal duro a 1000°C tem a mesma dureza que o aço rápido a temperatura ambiente;
- f) Possibilidade de propriedades distintas pela mudança específica dos carbonetos e do ligante.

Para melhorar as propriedades dos metais duros utilizados como ferramenta de corte, principalmente propriedades físicas e mecânicas, comumente são adicionados ao metal duro elementos de liga, que conferem à ferramenta uma maior durabilidade, diminuindo desgastes como difusão e dissolução.

Os principais elementos adicionados ao metal-duro são:

- a) Carboneto de Titânio (TiC);
- b) Nitreto de Titânio (TiN);
- c) Carboneto de Nióbio (NbC);
- d) Carboneto de Tântalo (TaC);

Outro fator que contribui para a melhoria do desempenho das ferramentas de metal-duro é a aplicação de revestimentos duros na ferramenta. Isto proporciona uma redução significativa do desgaste das ferramentas, conseqüentemente aumentando a vida útil da mesma (WESTRUPP, 2008).

2.4.2.1 Classificação de ferramentas em metal duro

A norma ISO estabelece três campos de aplicação, os quais referenciam os tipos de materiais a serem usinados, e são designados pelas letras P, M e K:

- Classe ISO P (representado pela cor azul): abrange o campo de aplicação de materiais que produzem cavacos longos como os aços carbono e aços de baixa liga.
- Classe ISO M (representado pela cor amarela): relacionam principalmente materiais de difícil usinagem como os aços inoxidáveis, aços fundidos, aços ao manganês e ferro fundido maleável.
- Classe ISO K (representado pela cor vermelha): compreende materiais que geram cavacos curtos, como os ferros fundidos cinzentos, latão e bronze.

A norma ISO 513 prevê ainda propriedades relevantes para a seleção do material cortante como a resistência ao desgaste (dureza) e a tenacidade. Dentro da classificação, cada grupo de usinagem recebe uma graduação numérica segundo as exigências e a severidade da operação. Quanto menor o valor da graduação, mais duro e resistente ao desgaste será o metal duro daquele grupo de usinagem. Do contrário, quanto maior o valor da graduação maior será a tenacidade do metal duro dentro do grupo. A Figura 5 apresenta a classificação do metal duro.

Figura 5 - Classificação dos tipos de metal-duro.

Grupo de usinagem	Subgrupo de usinagem	Propriedades	
		Tenacidade	Resistência ao desgaste
P	P10	-	+
	P20		
	P30		
	P40		
	P50		
M	M10	-	+
	M20		
	M30		
	M40		
K	K10	-	+
	K20		
	K30		
	K40		

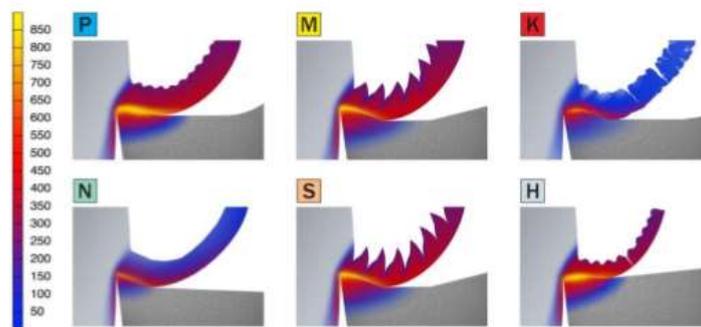
Fonte: (DAVIM, 2007)

Devido à grande quantidade de materiais utilizados na indústria atualmente, foram incluídas três classes adicionais, permitindo assim uma melhor seleção do tipo de metal-duro a ser utilizado em determinada operação, o que leva a melhores resultados. As classes incluídas são:

- Classe ISO N: Para materiais não ferrosos: ligas de alumínio, ligas à base de magnésio, cobre, cobre eletrolítico, bronze e latão.
- Classe ISO S: (Superligas resistentes ao calor e titânio) ligas à base de níquel, ferro e cobalto, em geral materiais com uma elevada potência de corte e alta resistência em elevadas temperaturas.
- Classe ISO H: (Aços endurecidos) Aços endurecidos e temperados com durezas de 45 – 68 HRC, ferro fundido branco (~ 50 HRC).

A Figura 6 mostra a distribuição de temperaturas na região de corte e o tipo de cavaco para as diferentes classes de metal duro, tornando mais visível a mecânica envolvida em cada tipo de material a ser usinado.

Figura 6 - Seção de corte ilustrando o cavaco produzido por classes diferentes de metal-duro. Temperaturas em graus Celsius.



Fonte: (SANDVIK-COROMANT, 2010)

2.5 Coberturas

Ferramentas de metal duro revestido possuem grande importância na indústria atualmente, pois em comparação com as ferramentas sem revestimento seu rendimento se demonstra muito superior, principalmente na usinagem de materiais ferrosos, que por sua vez são os mais utilizados na indústria mecânica. (Machado et al., 2009),

O autor ainda revela, que 95% das ferramentas de metal duro utilizadas na indústria atualmente são revestidas, e esse valor possui tendência de crescimento ao longo do tempo.

Dentro dos principais fatores que induzem este aumento da utilização deste tipo de ferramenta estão, o maior domínio das técnicas de revestimento, o custo mais acessível deste produto e a aplicabilidade dos revestimentos em qualquer tipo de metal duro.

Dentre os principais processos de deposição de coberturas em ferramentas de metal duro estão o PVD (Deposição Física a Vapor) e o CVD (Deposição Química a Vapor). O processo PVD caracteriza-se pela criação de vapor a uma temperatura de 200 a 500 °C, a partir de um determinado material e em seguida a condensação em forma de filme no sobre o material de base (ferramenta), com a adição no filme de alguns componentes utilizando um gás reativo na atmosfera do forno (BUNSHAH, 2001).

Segundo Sudarshan (1989), o CVD é definido como um processo no qual ocorre a mistura de gases que interagem com a superfície de um substrato (ferramenta), em uma temperatura de aproximadamente 1000 °C, resultando na decomposição de alguns constituintes da mistura dos gases e causando a formação de um filme sólido sobre o substrato.

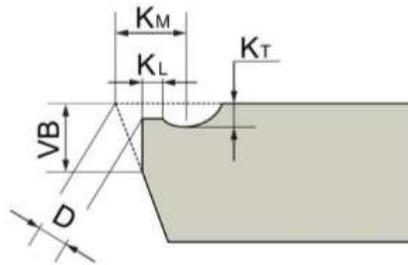
Os principais revestimentos aplicados em ferramentas de metal duro são, Carboneto de titânio (TiC), Nitreto de titânio (TiN), Óxido de alumínio (Al₂O₃), Carbonitreto de titânio (TiCN), Nitreto de titânio alumínio (TiAlN), Nitreto de cromo alumínio (AlCrN) (ABELE & DÖRR, 2002).

2.6 Desgaste da ferramenta

Durante o processo de corte, a ferramenta é submetida a elevadas temperaturas e esforços de corte, os quais geram desgaste na ferramenta. O desgaste ocorre de forma progressiva, reduzindo assim a eficiência da ferramenta após certo tempo. A figura 7 mostra as principais grandezas do desgaste da ferramenta, onde:

- a) VB: Largura da marca de desgaste de flanco;
- b) KT: Profundidade da cratera;
- c) KM: distância da cratera ao gume;
- d) D: Deslocamento do gume;
- e) KL: Faixa entre o gume e início da cratera.

Figura 7 - Grandezas do desgaste da ferramenta



Fonte: (STEMMER, 2005)

O tipo de desgaste depende:

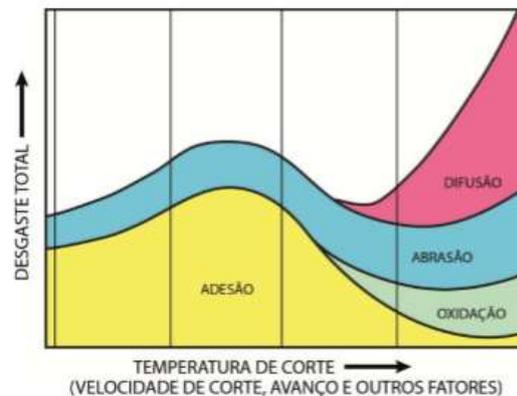
- Das condições de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade);
- Do material a ser usinado;
- Do material da ferramenta;
- Da geometria da peça;
- Do modo como a ferramenta atua sobre a peça (isto é, condições de entrada e saída, corte contínuo ou interrompido, comprimento de contato entre o gume e a peça, etc.)

Outras variáveis como rigidez estática da máquina, do porta ferramenta, do dispositivo de fixação da peça, a potência e força disponíveis da máquina também afetam o desempenho da ferramenta e causam o desgaste da mesma. (STEMMER, 2005).

2.6.1 Mecanismo de desgaste

O atrito que ocorre na superfície de saída da ferramenta e o calor gerado pelo cisalhamento do material da peça causam um aumento das exigências térmicas e mecânicas, resultando no desgaste da ferramenta devido a diferentes fenômenos físicos, os quais são apresentados na Figura 8 (incluindo sua relação com as condições de corte).

Figura 8 - Mecanismos de desgaste na ferramenta



Fonte: (KÖNIG, 1997)

Como é possível verificar na Figura 8, o desgaste da ferramenta é consequência de vários fenômenos físicos, dentre os quais estão (KÖNIG, 1997):

- a) Adesão (cisalhamento de microsoldagem ou microcaldeamentos);
- b) Difusão;
- c) Oxidação;
- d) Abrasão mecânica;

2.6.1.1 Adesão

O mecanismo de desgaste por adesão ou também conhecido como aresta postiça ocorre devido às altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte, e ao fato de que a superfície inferior do cavaco, recém arrancado, apresenta-se limpa, sem camadas protetoras de óxidos e, portanto, quimicamente muito ativa. (ROCHA, 2009)

2.6.1.2 Difusão

A difusão ocorre em temperaturas mais elevadas, nas quais as moléculas adquirem certa mobilidade. Para ferramentas de aço carbono e aço rápido esta forma de desgaste é desprezível, pois nestes materiais a faixa de temperatura de difusão é bem mais alta que a temperatura de amolecimento da ferramenta. Porém, nos metais duros este desgaste deve ser levado em conta, pois na faixa de 700 a 1300°C, durante a usinagem de peças de aço podem ocorrer os seguintes

fenômenos (KÖNIG, 1997):

- a) Difusão do cobalto no ferro, formando uma liga de baixo ponto de fusão e de fácil desgaste.
- b) Difusão do carbono, que é retirado dos carbonetos duros e imigra para o ferro.
- c) Dissolução do carboneto de tungstênio na liga pastosa cobalto carboneto de tungstênio-ferro.

2.6.1.3 Oxidação

Ao observar uma ferramenta após o corte, muitas vezes é possível visualizar nas proximidades da região de contato entre ferramenta e a peça aparecimento de cores de revenimento que são provocadas pela oxidação da ferramenta. O metal duro inicia sua oxidação na faixa de temperatura entre 700 a 800°C (STEMMER, 2005).

2.6.1.4 Abrasão mecânica

O mecanismo de abrasão mecânica ocorre em toda a faixa de temperatura a qual a ferramenta de corte é submetida durante o corte, é basicamente o atrito decorrente do contato entre a peça e a ferramenta. (ROCHA, 2009).

2.6.2 Tipos de desgaste na ferramenta

Os fenômenos apresentados no item anterior levam à falha catastrófica da ferramenta que ocorre principalmente sob três formas distintas (STEMMER, 2005), sendo:

- a) Lascamento do gume
- b) Desgaste no flanco
- c) Desgaste na face

2.6.2.1 Lascamento do gume

O lascamento ou a quebra de pedaços do gume gera superfícies ásperas e irregulares na peça, resultantes de uma sobrecarga das tensões de tração mecânica na ferramenta. Estas tensões podem ocorrer por vários motivos, como picos de forças de corte como no corte interrompido, elevadas forças de corte como em profundidade de corte ou avanço muito alto, inclusão de areia

no material da peça, aresta postiça, vibrações ou desgaste excessivo na ferramenta. A Figura 9 ilustra uma ferramenta de metal duro com o gume lascado. (SANDVIK-COROMANT, 2010)

Figura 9 - Lascamento do gume

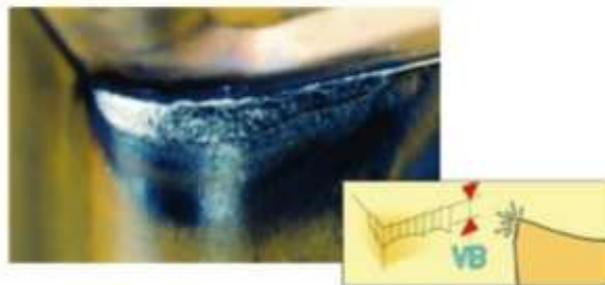


Fonte: (SANDVIK-COROMANT, 2010)

2.6.2.2 Desgaste de flanco (VB)

O desgaste no flanco é o tipo mais comum de desgaste. Este tipo de desgaste ocorre devido à abrasão causada por constituintes duros no material da peça. A Figura 10 ilustra uma ferramenta de metal-duro com desgaste de flanco. (SANDVIK-COROMANT, 2010).

Figura 10 - Desgaste no flanco



Fonte: (SANDVIK-COROMANT, 2010)

2.6.2.3 Desgaste na face (superfície de saída).

O desgaste na face ou de cratera é gerado devido ao atrito da ferramenta com o cavaco, o que gera a reação química entre o material da peça e da ferramenta e cresce devido à

velocidade de corte. A formação da cratera enfraquece o gume e pode levar à quebra. O desgaste de cratera é ilustrado na Figura 11:

Figura 11 - Desgaste na face (cratera)



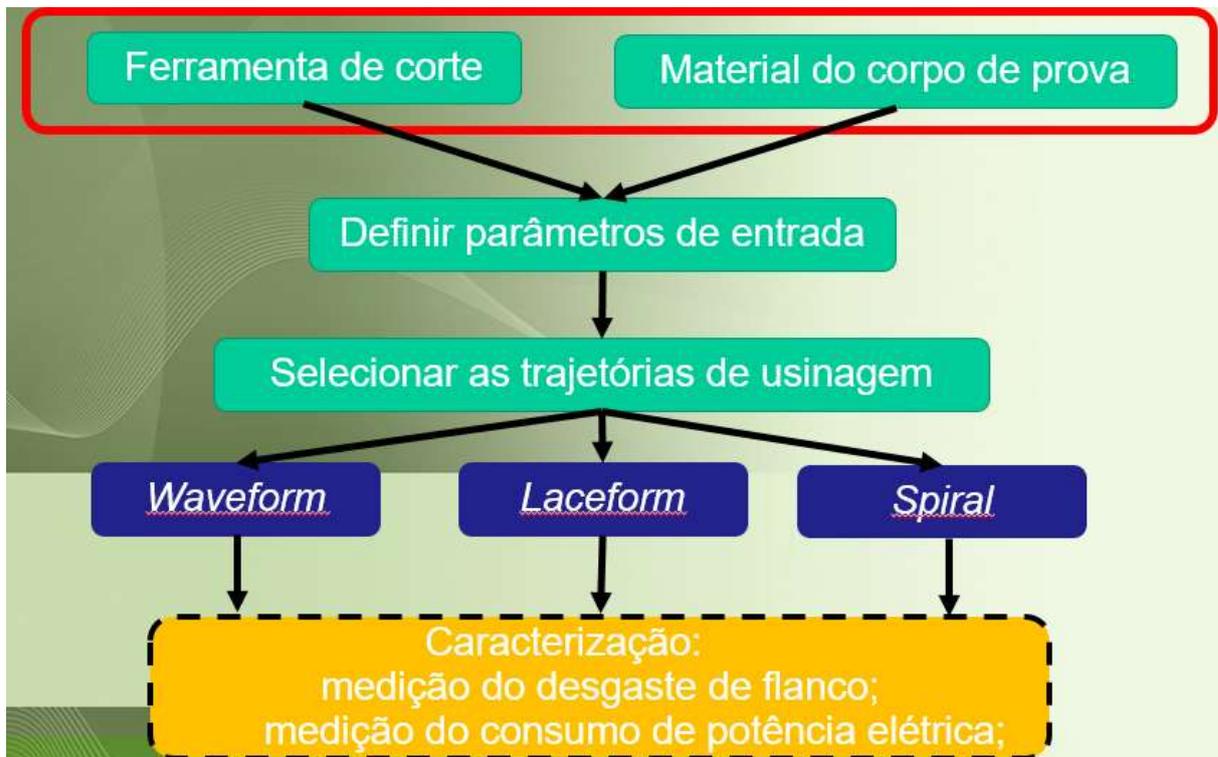
Fonte: (SANDVIK-COROMANT, 2010)

Diversos trabalhos têm sido realizados para avaliar o desgaste e avaria que ocorre durante o fresamento considerando diferentes parâmetros de corte, tipos de ferramentas, materiais da fresa e da peça. Silva et al. (2011) apresentaram um estudo sobre o desgaste de flanco em fresas de metal duro revestidas com Al_2O_3 durante a usinagem de diferentes classes de ferro fundido cinzento e vermicular. Moura et al. (2015) avaliaram o desempenho de fresas de topo inteiriças de metal duro com diferentes revestimentos e parâmetros de corte na usinagem de aços P20. Outros trabalhos, nessa mesma linha de pesquisa, podem ser observados em Jawaid, Sharif e Koksai (2000), Zhang e Li (2010), Zhang, To e Zhang (2016).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, caracterizando os equipamentos e materiais utilizados. O método proposto para o desenvolvimento deste trabalho segue conforme as etapas apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma de desenvolvimento metodológico.



Fonte: O autor (2016)

Como mencionado anteriormente, este trabalho visa avaliar a influência da trajetória de usinagem no desgaste da ferramenta durante a operação de desbaste por fresamento de cavidade em aço AISI P20. Desta forma, por se tratar de uma operação de desbaste de bolsões para molde de injeção de termoplásticos, selecionou-se uma ferramenta inteiriça de metal duro, comumente utilizado na indústria de fabricação desse componente.

Os projetos dos corpos de prova foram desenvolvidos através do modelamento gráfico utilizando software CAD Solid Works 2014.

Definiu-se como corpo de prova, uma cavidade com geometria retangular com largura x comprimento x profundidade, respectivamente: 145 x 195 x 3mm, partindo de um bloco cúbico bruto com dimensões de 150 x 200 x 50mm, do aço ferramenta AISI P20, conforme a

composição apresentada na tabela 4, possuindo aproximadamente 85 cm³ de volume removido. As dimensões da cavidade citada foram definidas para o melhor aproveitamento do material disponível e mantidos como parâmetro fixo para as três trajetórias, afim de possuir o mesmo volume de material usinado.

Tabela 4 - Composição química nominal % do aço AISI P20

Material	C	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Si
P-20	0,50 - 0,60	0,5 - 0,8	0,60 - 0,80	0,25 - 0,35	1,50-1,80	0,07-0,12	0,15 - 0,35

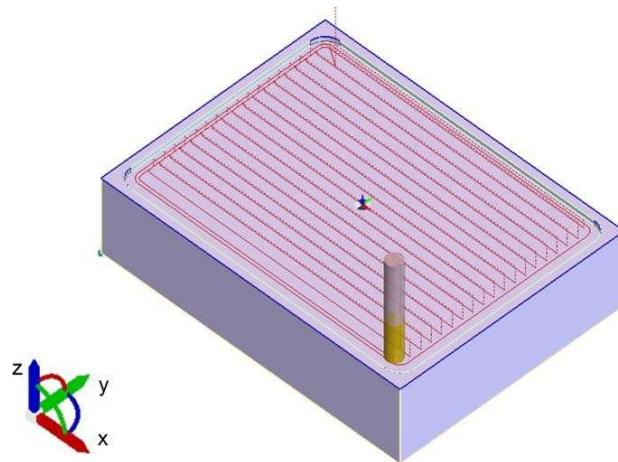
Fonte: Favorit, 2017.

A geração das trajetórias de usinagem se deram através do software EdgeCAM®, este que é capaz de gerar caminhos a partir de dados inseridos pré-determinados como, as dimensões da peça e ferramenta, parâmetros de corte e métodos de movimentação. Através do link entre este software e o SolidWorks é possível desenvolver este processo diretamente a partir da peça já modelada.

Dentre as possíveis trajetórias fornecidas pelo software EdgeCAM para a operação de desbaste, foram selecionadas três, Waveform, Laceform e Spiral. Tais estratégias se diferenciam principalmente, o método de entrada da ferramenta na peça, o tipo de varredura de usinagem, quantidade de eixos movimentando-se simultaneamente e os tempos totais e secundários de usinagem. Foi mantido como parâmetro fixo entre as trajetórias o tipo de movimentação discordante.

A trajetória do tipo Laceform tem por característica a varredura em série de percursos lineares paralelos em relação ao eixo X. A entrada ocorre em rampa com inclinação de 10° em relação a superfície de referência, através do incremento (ap) de 3 mm no eixo Z e o deslocamento linear combinado nos eixos X e Y. No modelo aplicado, o posicionamento do ponto de entrada localizou-se à esquerda da peça, deslocando no sentido do eixo X, ao termino do deslocamento neste eixo, saindo da cavidade movendo o eixo Z a uma altura de segurança de 5 mm, retornando rapidamente ao ponto de entrada e iniciando um novo movimento com profundidade de corte lateral (ae) de 2mm no eixo Y, repetindo este processo até a finalização da cavidade com um passe contínuo ao longo da periferia da geometria. A Figura 13 mostra a trajetória do tipo Laceform utilizada.

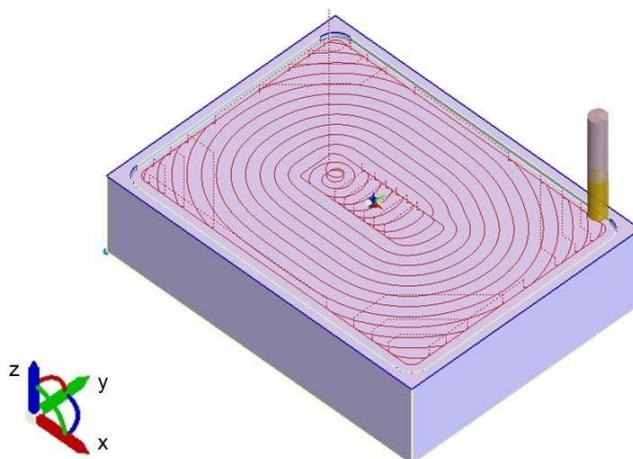
Figura 13 - Trajetória Laceform.



Fonte: O Autor

A trajetória de usinagem do tipo Waveform, tem o objetivo de reduzir o desgaste da ferramenta, ao manter a carga na ferramenta o mais constante possível em uma espessura de corte geralmente constante, principalmente na ocorrência de cantos vivos e geometrias curvas na peça. Esta trajetória inicia com entrada incremental elíptica inclinada em 10° movimentando simultaneamente os eixos X,Y e Z. Seguindo a varredura numa combinação de movimentos do tipo toroidal no centro e nos cantos e de maneira semicircular no restante da peça, mantendo o movimento constante dos eixos X e Y. A Figura 14 mostra a trajetória Waveform na cavidade ensaiada.

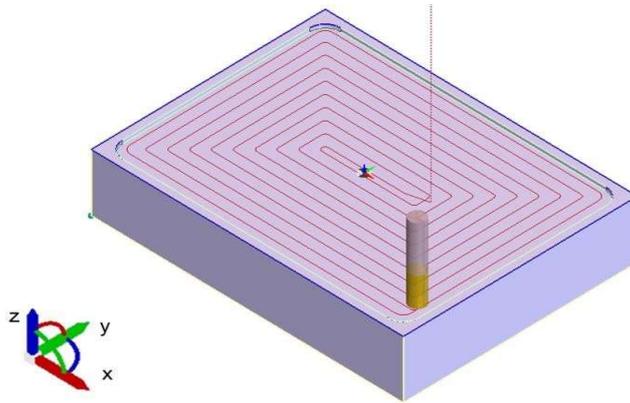
Figura 14 Trajetória Waveform



Fonte: O Autor

A trajetória Spiral reproduz uma entrada em rampa com ângulo de 10° em relação a face de referência no centro da usinagem, seguida por uma interpolação linear em formato de espiral realizando incremento lateral (ae) de 2 mm. A mudança de sentido entre os eixos X e Y é suavizada com uma interpolação circular parcial. Nesse método não houve tempos secundários durante a formação de cavaco, mantendo a ferramenta em constante trabalho. A Figura 15 mostra a trajetória percorrida pela ferramenta na peça.

Figura 15 - Trajetória Spiral



Fonte: O Autor

A máquina ferramenta utilizada para o desenvolvimento da usinagem das amostras foi o centro de usinagem, marca Romi modelo D600 com as seguintes especificações técnicas: Cone do eixo árvore ISO 40, versão 7.500rpm, avanço rápido (eixos X, Y e Z) 30 m/min, avanço de corte programável 8 m/min, posicionamento (eixos X, Y e Z) 0,002 a 0,006 mm repetibilidade. Potência total instalada KVA 30. Modelo - GE-Fanuc 0i-MC. A Figura 16 mostra a máquina utilizada nos ensaios.

Figura 16 - Foto do centro de usinagem utilizado nos ensaios.



Fonte: O Autor.

O corpo de prova foi fixado por morsa hidráulica com capacidade de 3500 kgf e fixação da ferramenta de corte por cone com fixação da ferramenta do tipo weldon.

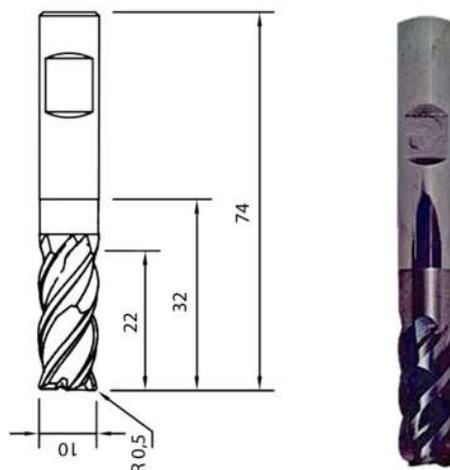
Figura 17 - Foto do método de fixação da amostra e da ferramenta.



Fonte: O Autor.

A ferramenta utilizada foi selecionada com base nas condições disponibilizadas pela instituição de ensino na qual realizou-se os testes, tais condições são, disponibilidade de verba, dimensões do corpo de prova, capacidade do sistema de fixação e limites de rotação e potência do centro de usinagem utilizado. Mediante a tais limitações selecionou-se a ferramenta para o desenvolvimento dos ensaios uma fresa inteiraça de metal duro modelo FRD Gold, fabricante VRtools, possuindo revestimento PVD, feito pela Oerlikon Balzers, Alcrona® (AlCrN), com quatro arestas de corte, diâmetro periférico de 10mm, comprimento útil de corte de 22 mm e comprimento total de 73 mm. Conforme a Figura 18.

Figura 18 - Desenho detalhado da fresa utilizada e fotografia desta, respectivamente.



Fonte: VRTools, 2017.

Os experimentos foram divididos de forma que se realizou para cada tipo de trajetória 3 passes ordenados com profundidade de 3mm cada, realizando 4 réplicas, totalizando 36 ensaios. Os ensaios de fresamento foram realizados com parâmetros fixos, conforme a tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de entrada utilizados nos ensaios.

Velocidade de avanço (vf)	3150 mm/min
Profundidade de corte axial (ap)	3 mm
Profundidade de corte radial (ae)	2 mm
Velocidade de corte (Vc)	200 m/min

Fonte: O autor.

Utilizando as trajetórias desenvolvidas e inseridas no equipamento em forma de linhas de programação usinando a cavidade desejada.

O desgaste da ferramenta foi avaliado a partir da medição do VB, que é a diferença de altura do gume antes e depois da usinagem. Tal medida foi obtida através do aparelho chamado Microscópio Estereoscópio da marca Carl Zeiss modelo Stemi 4000t juntamente com o software Axion vision 5.0, que possibilita a integração do aparelho com o computador, digitalizando as imagens obtidas, afim de observar e medir com clareza essa diferença através da captação e ampliação da imagem da ferramenta antes e depois da usinagem, medindo a altura do gume e verificando o comprimento VB. As medições foram realizadas após cada passe realizado.

Para efetuar a medição foi necessário o desenvolvimento do suporte para ferramenta, que possui furação inclinada que garante a perpendicularidade da superfície de folga a partir da aresta frontal de corte da ferramenta com a lente do microscópio, garantindo a correta medição do desgaste. Conforme a Figura 19.

Figura 19 - Microscópio Estereoscópio Carl Zeiss modelo Stemi 4000t e suporte desenvolvido para medições.



Fonte: O Autor.

Realizou-se também a medição de consumo de potência elétrica durante os ensaios, afim de analisar o desempenho de cada trajetória com relação ao consumo de energia elétrica para a realização da usinagem.

O equipamento utilizado para o monitoramento do consumo de energia elétrica foi o analisador de qualidade de energia Fluke434 II - Número de entradas 4 (3 fases + neutro) CC pareada. Tensão máxima de entrada 1000 Vrms. Limite de tensão nominal selecionável: 1 V a 1000 V de acordo com IEC61000-4-30. Velocidade máxima de amostragem 200 kS/s em cada canal simultaneamente. Amostragem RMS 5000 amostras em 10/12 ciclos em conformidade com IEC 61000-4-30. Sincronização PLL 4096 amostras em 10/12 ciclos em conformidade com IEC 61000-4-7. Software Power Log, para carregar dados de tendência em forma de onda e capturas de tela no formato com comunicação para microcomputador. A montagem foi realizada no painel com leituras de tensão e corrente simultâneas, todos os dados foram importados para o software que realiza a contagem dos dados coletados. Os dados do consumo de energia elétrica são evidenciados através da medição de potência do equipamento ao desenvolver cada trajetória. A Figura 20 demonstra como foi ligado o equipamento na máquina ferramenta. Optou-se ligar na saída do transformador secundário para evitar modificação da ligação de alimentação da máquina. Utilizou-se também um alicate amperímetro para realizar um controle visual secundário em uma das fases elétricas durante os ensaios.

Figura 20 - Fotografia da ligação e do equipamento analisador de qualidade de energia Fluke434 II.



Fonte: O Autor.

Após a tabulação dos resultados obtidos, realizou-se o cruzamento dos dados permitindo uma melhor análise, para verificar a real influência da trajetória no desgaste da ferramenta e por fim propor dentre as trajetórias avaliadas qual obteve os melhores resultados.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

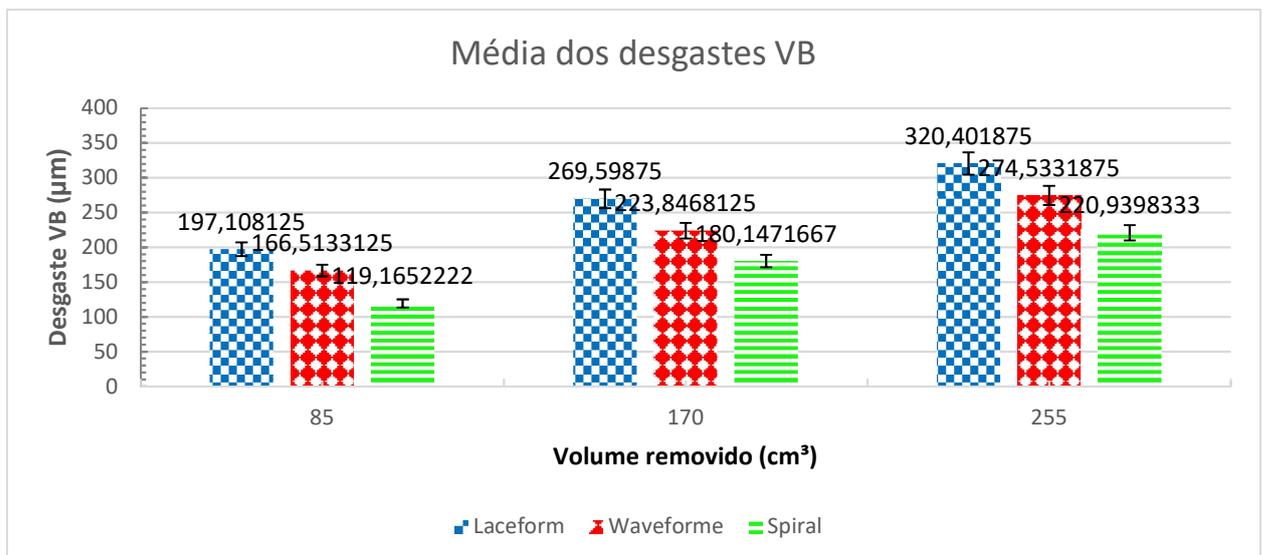
Através das etapas propostas nas seções anteriores visa-se propor a trajetória de usinagem ideal que promova menor desgaste da ferramenta, possibilitando assim um maior rendimento da produção utilizando menos recursos, ou seja, otimizando este tipo de processo.

4.1 Resultados dos experimentos

A partir dos ensaios realizados foi possível avaliar os desgastes que ocorreram nas três diferentes estratégias de usinagem. Os resultados dos ensaios mostram a predominância de desgaste com alguns casos de lascamento da aresta de corte da fresa.

A Figura 21 mostra os desgastes máximos de flanco (VB_{máx}) para as estratégias de usinagem dos tipos Laceform, Waveform e Spiral, para os volumes removidos de material de 85 cm³, 170 cm³ e 255 cm³. É possível verificar que o maior desgaste ocorre na estratégia do tipo Laceform, o menor na estratégia tipo Spiral, e a do tipo Waveform apresentou valores intermediários de desgaste.

Figura 21 - Gráfico de desgastes de flanco VB_{máx} para as três trajetórias avaliadas.



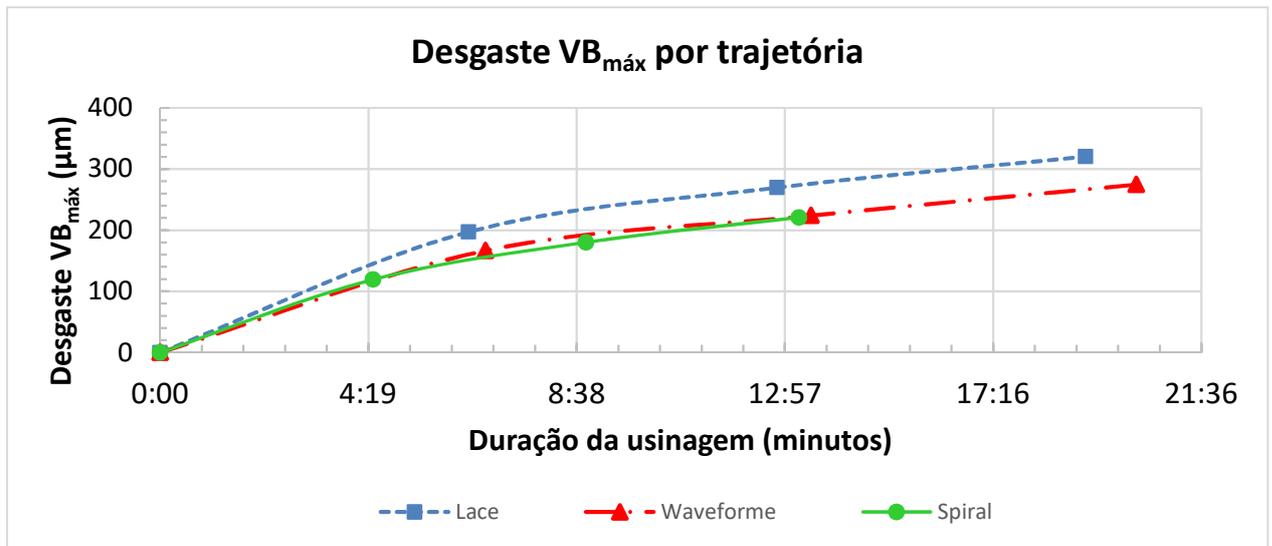
Fonte: O Autor.

A Figura 22 mostra a evolução do desgaste de flanco máximo (VB_{máx}) em relação ao tempo de usinagem para as três diferentes estratégias avaliadas. É possível verificar que a curva

de desgaste da estratégia tipo Laceform apresenta valores maiores do que as demais, devido principalmente ao maior número de entradas e saídas da ferramenta ao longo do processo. As curvas de desgaste das estratégias Waveform e Spiral são bastante semelhantes. Entretanto, a estratégia Waveform demandou um tempo maior para a usinagem do corpo de prova, devido à série de movimentos realizados. Por esse motivo, a trajetória do tipo Spiral apresentou melhores resultados nos ensaios realizados.

Outro aspecto interessante a observar nas curvas da Figura 22 são as duas regiões existentes. Na região inicial, denominada de região primária, ocorreu um desgaste mais intenso nas três estratégias avaliadas. Essa região se estendeu até um tempo de aproximadamente 6 minutos. Na região secundária, que ocorreu a partir de 6 minutos, a evolução do desgaste foi menos acentuada, entretanto, a curva do tipo Spiral apresentou uma inclinação maior do que a Waveform.

Figura 22 - Curvas de desgaste de flanco $VB_{m\acute{a}x}$ para três estratégias de usinagem.



Fonte: O Autor.

A Figura 23 mostra a vista de topo de uma fresa utilizada no ensaio. É possível observar os detalhes das quatro arestas de corte existentes, bem como o tipo de afiação empregada.

Figura 23 - Fotografia da fresa após o primeiro passe na trajetória laceform.

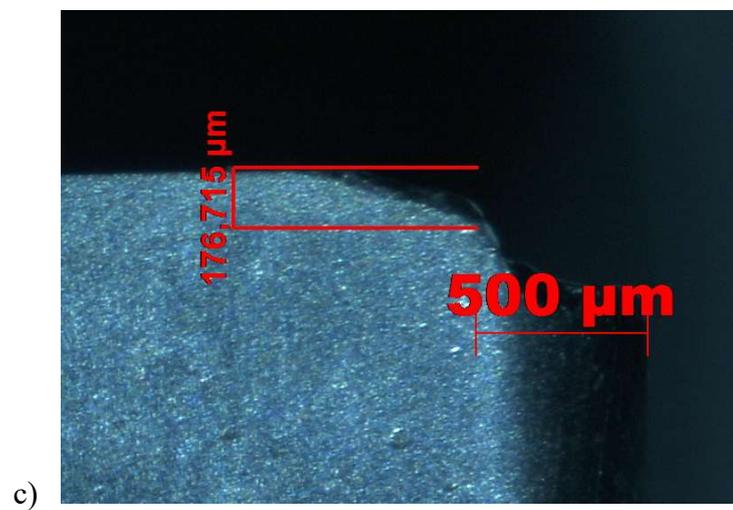
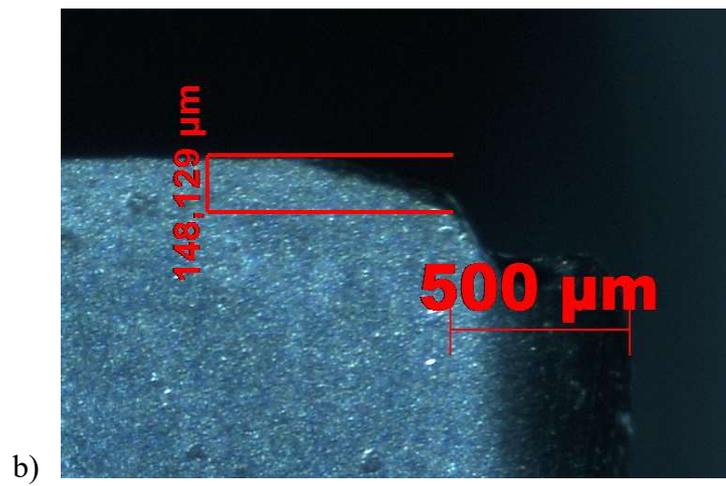
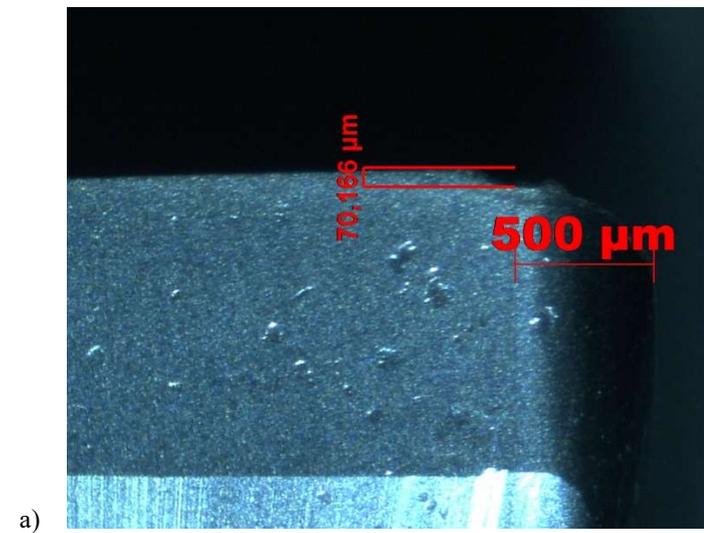


Fonte: O Autor.

A figura 24 mostra o desgaste máximo de flanco, medido na superfície de folga a partir da aresta frontal de corte da fresa de topo de metal duro utilizada no primeiro corpo de prova para estratégia Waveform, excluindo a região do raio da ponta.

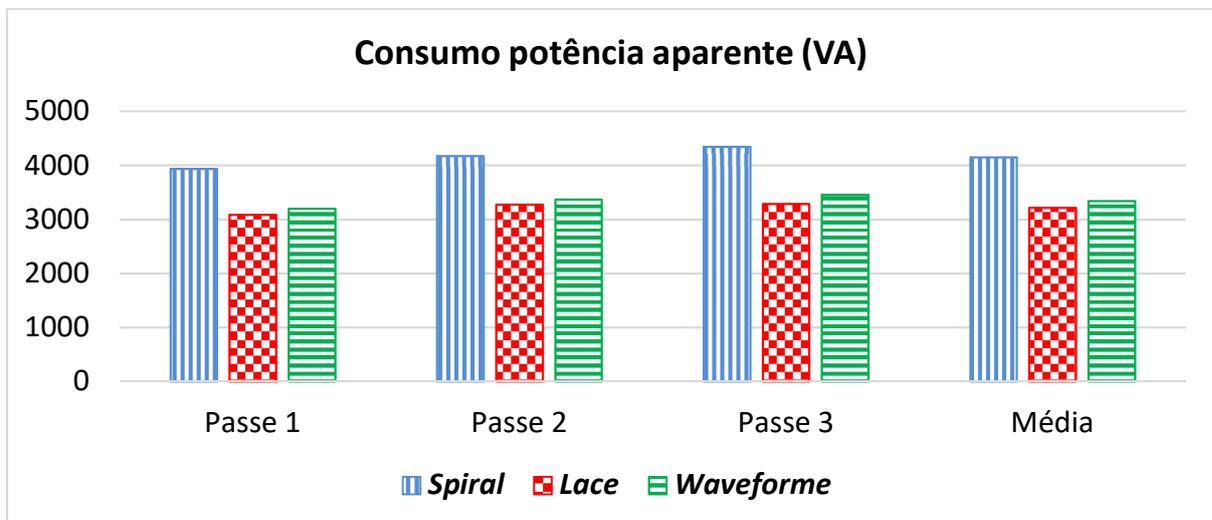
Na Figura (24a) tem-se o desgaste para um volume de material removido de 85 cm^3 , na Figura (24b) tem-se o desgaste para um volume de material removido de 170 cm^3 , e na (24c) o desgaste para um volume de 255 cm^3 .

Figura 24 – Desgaste de flanco máximo VBmáx: (a) volume de material removido de 85 cm³, (b) volume de material removido de 170 cm³, (c) volume de material removido de 250 cm³.



A Figura 25 mostra a evolução do consumo de potência elétrica aparente para as três diferentes estratégias de usinagem avaliadas. É possível verificar que a coluna de consumo da estratégia tipo spiral apresenta valores maiores do que as demais, devido principalmente a estar predominantemente em movimentos ativos que exigem maiores esforços da máquina ferramenta, conseqüentemente maior consumo de potência elétrica ao longo do processo mantendo o eixo “Z” imóvel e realizando movimentações alternadas entre os eixos “X” e “Y”. A coluna de consumo da estratégia Waveform, demonstra um consumo reduzido em comparação com a estratégia spiral, mesmo possuindo também a predominância de movimentos ativos, devido aos movimentos trocoidais que reduzem esforços de corte em regiões críticas como cantos vivos, visando também a manutenção da espessura do cavaco durante todo o processo. A estratégia do tipo Laceform apresenta os melhores resultados em comparação as demais, devido a trajetória possuir em sua maioria movimentos passivos, que exigem menor esforço da máquina ferramenta.

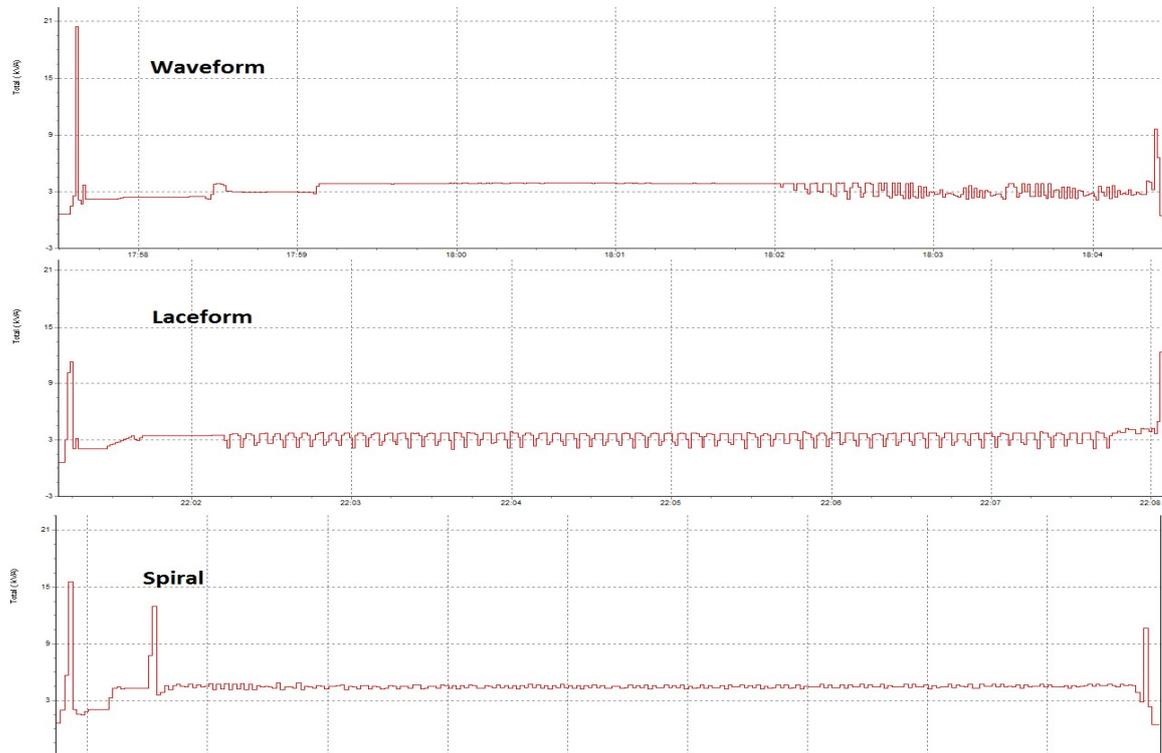
Figura 25 - Gráfico de consumo de potência elétrica aparente para as três trajetórias avaliadas.



Fonte: O Autor.

A Figura 26, demonstra os gráficos de leitura do aparelho de medição utilizado onde é possível verificar claramente a diferença de consumo de potência elétrica em cada trajetória, confirmando as avaliações realizadas anteriormente que demonstram as características específicas de cada trajetória.

Figura 26 - Gráficos de leitura do analisador de qualidade de energia.



Fonte: O Autor.

Os resultados dos ensaios mostraram que, no fresamento de geometrias simples de fundo plano em aço AISI P20, com fresa de topo inteiriça em metal duro, a estratégia do tipo Spiral apresenta um desempenho superior quanto à redução do desgaste de flanco (VB) da ferramenta na usinagem, quando comparada com as estratégias Laceform e Waveform. Os dados obtidos do desgaste da ferramenta para os volumes removidos de material de 85cm^3 , 170cm^3 e 250cm^3 mostram uma mesma tendência de redução do desgaste para o tipo Spiral, quando comparada com as demais estratégias avaliadas. O trabalho apresentado não confirma os resultados obtidos por Pleta, Ulutam e Mears (2015) e o trabalho apresentado por Ibaraki, Yamaji e Matsubara (2010) que mostram um melhor desempenho de estratégias com o uso de movimentos trocoidais, como a empregada no tipo Waveform. Entretanto, as diferenças entre os trabalhos são possivelmente devido ao tipo de geometria da cavidade utilizada nos ensaios. Ao contrario desses pesquisadores que avaliaram a usinagem de geometrias complexas, com cantos vivos, o presente estudo utilizou como cavidade uma geometria retangular simples com fundo plano.

A estratégia de usinagem com movimentos trocoidais é recomendada para reduzir esforços de corte em regiões críticas como cantos vivos e regiões com variação de espessura. Esse tipo trajetória tende a gerar movimentos adicionais da ferramenta aumentando o seu percurso. Outro fator que pode explicar a diferença de resultados entre os estudos é que foram

utilizados diferentes materiais e geometrias das fresas de topo. Em resumo, o presente trabalho permitiu verificar que a estratégia de usinagem com movimentos da fresa na forma de espiral permite reduzir o tempo de usinagem e o desgaste da fresa em aplicações de fresamento de topo de superfícies planas, sem a existência de cantos vivos e variações de espessura.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios realizados mostraram que a trajetória da ferramenta é um fator que afeta fortemente o seu desgaste, por permitir uma redução do tempo de usinagem e um melhor controle dos esforços de corte. A melhor estratégia de desbaste depende de alguns fatores, como a geometria da peça e da ferramenta. Por esse motivo é importante que os estudos, visando a otimização do fresamento, considerem, além dos parâmetros de corte e materiais das ferramentas, uma avaliação criteriosa das trajetórias das ferramentas durante o desbaste.

5.1 Conclusão

Embasado nos capítulos anteriores pôde-se alcançar com êxito os objetivos preestabelecidos no início dessa pesquisa. Salienta-se que os resultados obtidos podem contribuir para o desenvolvimento de novos métodos envolvendo experimentos na área da usinagem ou mesmo a otimização do processo. Sendo assim, são descritas a seguir algumas conclusões obtidas com o desenvolvimento desse trabalho:

- a) A trajetória de usinagem influencia diretamente no desgaste de flanco VB em usinagem de desbaste com fresas de topo em metal duro.
- b) A trajetória de usinagem com formato espiral reduz o desgaste da ferramenta em usinagens de cavidades com geometrias simples e de fundo plano, quando comparado a usinagens com geometrias complexas.
- c) A trajetória de usinagem influencia diretamente no tempo e no consumo de potência elétrica durante o processo de fresamento;
- d) A trajetória de usinagem Spiral obteve menor tempo, por não haver tempos secundários de usinagem a partir do primeiro contado com a corpo de prova. Apresentou menor valor de desgaste e consumo de potência elétrica 29% acima da trajetória Laceform.
- e) A trajetória Waveform obteve tempo de usinagem 53% maior e desgaste 24% maior em relação a trajetória Spiral e consumo de potência elétrica 4% maior comparados a trajetória Laceforme.
- f) A trajetória Laceform obteve tempo de usinagem 45% maior e desgaste 45% maior em relação a trajetória Spiral e consumo o menor valor de potência elétrica.

O presente estudo revela a importância da correta seleção do tipo de trajetória utilizada na usinagem por fresamento, visando a otimização do processo, referente a diversos parâmetros como desgaste da ferramenta, tempo total de usinagem e consumo de potência elétrica, fatores

estes que em escala produtiva afetam diretamente em custos de processos e produtos.

Com base nos dados de saída obtidos, se torna visível a impossibilidade de definir unicamente o tipo de trajetória que abrange os melhores resultados em todos os parâmetros. Cabe ao setor de aplicação avaliar otimizações para escolha da trajetória, desta forma é necessário, confrontando os resultados, uma avaliação de prioridade. As características elencadas nesse trabalho para prioridades foram: menor desgaste, tempo de produção e consumo de potência elétrica para de fabricação.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Conforme os resultados e conclusões deste trabalho, são apresentados a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Analisar as mesmas trajetórias reduzindo velocidades de corte e aumentando o volume de matéria removido.
- b) Analisar as mesmas trajetórias na usinagem de perfis com geometria complexa.
- c) Realizar uma análise aprofundada em relação aos custos relacionando com os fatores estudados neste.
- d) Pesquisar novas trajetórias para otimização em usinagem com geometrias simples de fundo plano.

REFERÊNCIAS

ABELE, E.; DÖRR, J. (2002), “Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica”, *Máquina e Metais*, pp. 38-53.

BERKENBROCK, E. (2012). Estudo das componentes cartesianas da força de usinagem no fresamento de formas complexas. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Tupy IST/SOCIESC.

BUNSHAH, R. F. Handbook of hard coatings: deposition technologies, properties and applications. 1 ed. New York: Editora William Andrew, 2001. 550p.

COELHO, R.T. BRAGHINI Jr A; VALENTE, C. M; Medalha, G. C. 2003. Experimental evaluation of cutting force parameters applying mechanistic model in orthogonal milling. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, Rio de Janeiro, v.35, n.3, p.247-253.

COSTA, A. R. Otimização do processo de fresamento de cavidades com fresas de insertos intercambiáveis. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Campinas.

CRACKNELL, P.S.; DYSON, R.W. “Handbook of thermoplastics injection mould design”. 1ª Edição, Chapman & Hall. London, 1993.

DAVIM, P. Machining: Fundamentals and recent advances. Londres: Springer-Verlag, 2007.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 8ª edição. São Paulo: Artliber, 2013. 270p.

FAVORIT AÇOS ESPECIAIS. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-ferramenta/aco-aisi-p20>>. Acesso em 01/12/2017.

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1970, p. 277-563.

GONZÁLEZ, D., M., O., FERREIRA, 2015, “ Geração de trajetórias trocoidais e espirais para o fresamento de cavidades 2,5d com múltiplas ferramentas”, 8º COBEF, Salvador, Brasil.

GROOVER, M. P. 2002. “Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, processes, and systems”. New Jersey: Ed. John Wiley & Sons.

HARADA, J. “Moldes para Injeção de Termoplásticos” – Projetos e Princípios Básicos. São Paulo: Artiber, 2004.

HELLENO, A. L. ; SCHÜTZER, K. . Interpolação polinomial: Um caminho para a redução do tempo de usinagem de moldes e matrizes. In: 2º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 2004, São Paulo. Anais do 2º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 2004. p. 185-194.

IBARAKI, S., YAMAJI, I., MATSUBARA, A., 2010, “On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving”, J. Precision Engineering, Vol. 34, No. 3, pp. 467-473.

JAWAID, A., SHARIF, S., KOKSAL, S., 2000, “Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 99, pp. 266- 274

KÖNIG, W. Fertigungsverfahren: Drehen, Frasen, Bohren. 5 edição. ed. Berlin.: Springer, 1997.

MACHADO, A.R., COELHO, R.T., ABRÃO, A.M., SILVA, M.B., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 371p.

MENGES, Georg; MICHAELI, Walter; MOHREN, Paul. “How to make injection molds”. 3ª Edição, Hanser. Munich, 2000.

MOURA, R. R., RESENDE, A. A., SILVA, M. B., MACHADO, A. R., SALES, W. F., 2015, “Desempenho de fresas de metal duro reafiadas no fresamento de topo de um aço P20 para moldes e matrizes”, 8º COBEF, Salvador, Brasil.

MURTHY SUNDARA, AND RAJENDRAN, I., 2010, “A study on optimization of cutting parameters and prediction of surface roughness in end milling of aluminium under MQL machining”, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 7, No. 1/2, pp. 112 - 28.

NG, E. G.; LEE, D. W.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K. Experimental evaluation of cutter orientation when ball nose end milling Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 2(2), p. 108-115, 2000.

PLETA, A., ULUTAN, D., MEARS, L., 2015, “An investigation of alternative path planning strategies for machining of nickel based super alloys”, *Procedia manufacturing*, Vol.1, pp.556-566.

POUZADA, A. S. “Moldes para produção de peças poliméricas”. *Manual do projetista para moldes de injeção de plástico. Volume 1. Marina Grande. CENTIMFE, 2003.*

REES, Herbert. *Mold Engineering*. Hanser. Munich, Vienna, New York, 1995.

RIGATTI, Aldo Marcel Yoshida. *Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte*. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista - Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2010.

ROCHA M., Á. et al. *Teoria da usinagem dos materiais*. [S.l.]: Blucher, 2009. 180–209 p.

ROSATO, Donald V. ROSATO, Dominick V. *Injection Molding Handbook*. Chapman & Hall. New York, 1995.

SALEHI, M., BLUM, M., FATH, B., AKYOL, T., HAAS, R., OVTCHAROVA, J., 2016, “Epicycloidal versus trochoidal milling- comparison of cutting force, tool tip vibration, and machining cycle time”, *Procedia CIRP*, Vol. 46, pp. 230 – 233.

SANDVIK, 2005, “Manual técnico de usinagem – torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação”, São Paulo. 601p.

SANDVIK-COROMANT, 2010. “Manual Técnico”. Estocolmo.

SANDVIK-COROMANT, Training Handbook, 2017. Disponível em: <http://sandvik.ecbook.se/SE/us-en/Training_Handbook>. Acesso 01/12/2017.

SANTOS, S. C., SALES, W.F., 2007, “Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”, ed. Artliber, São Paulo, Brasil, 246p.

SILVA, M.B., NAVES, V.T.G., MELO, J.D.B., ANDRADE C.L.F., GUESSER, W.L., 2011, “Analysis of wear of cemented carbide cutting tools during milling operation of gray iron and compacted graphite iron”, Wear, Vol. 271, pp. 2426-2432.

SOUZA, Adriano Fagali. Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades. 2004. 171 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

SOUZA, A. F., COELHO, R. T., RODRIGUES, A. R. (2010). Manufacturing complex geometries using high speed cutting technology. VDM Verlag. v. 1. 130 p.

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

STEMMER, C. E. Ferramentas de corte I. 6. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

SUDARSHAN, T. S. Surface modification technologies: an engineer’s guide. 1 ed. New York: Editora Marcel Dekker, 1989. 619p.

TOH, C. K. Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials. Materials and Design, v. 26, p. 517-533, 2005.

VENTURA, Carlos Eiji Hirata. Estudo dos esforços de corte no processo HSM aplicado à abertura de cavidades. 2010. 185 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VRTOOLS. Disponível em: < <http://www.vrtools.ind.br/catalogo/produtos-gold.pdf> (p.19) >. Acesso em 01/12/2017.

WESTRUPP, F. L. Análise da viabilidade da usinagem de compósito de matriz de epóxi com cargas de ferro visando a sua utilização em moldes de injeção. Florianópolis: Dissertação de Mestrado, UFSC, 2008.

ZHANG, S., LI, J., 2010, “Tool wear criterion, tool life, and surface roughness during high-speed end milling Ti-6Al-4V alloy”, *Applied Physics & Engineering*, Vol. 11, No.8, pp. 587-595.

ZHANG, G., TO, S., ZHANG, S., 2016, “Evaluation for tool flank wear and its influences on surface roughness in ultra- precision raster fly cutting”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 118, pp.125–134.