

Juliana dos Santos Solheid

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE
FRESAMENTO DE CAVIDADES 2½D PARA DIFERENTES TI-
POS DE TRAJETÓRIAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Solheid, Juliana dos Santos

Avaliação do consumo de energia no processo de fresamento de cavidades 2D para diferentes tipos de trajetórias / Juliana dos Santos Solheid ; orientador, João Carlos Espíndola Ferreira - Florianópolis, SC, 2016. 122 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Fresamento de Cavidades. 3. Geração de Trajetórias de Usinagem. 4. Consumo de Energia. 5. Manufatura Sustentável. I. Ferreira, João Carlos Espíndola. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Juliana dos Santos Solheid

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE
FRESAMENTO DE CAVIDADES 2½D PARA DIFERENTES TI-
POS DE TRAJETÓRIAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 22 de junho de 2016.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph. D. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. -Ing. Joel Martins Crichigno Filho
Universidade do Estado de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Ao Professor João Carlos Espíndola Ferreira, pela orientação e confiança, meus agradecimentos.

Aos integrantes do Grupo de Integração da Manufatura (GRIMA), David Gonzalez e Gerônimo Amaral, pelo auxílio.

Aos integrantes do Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON), pela infraestrutura e pelo suporte necessários para a realização deste trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao Rodolfo, pelo incentivo e ajuda dados a mim, e principalmente, pela paciência.

A todos que de alguma forma influenciaram de maneira positiva, direta ou indiretamente, eu agradeço.

RESUMO

O aumento da população, juntamente com a crescente escassez dos recursos naturais, vem aumentando a intensidade dos impactos ambientais. Estes fatores têm gerado um aumento na consciência social, forçando os órgãos reguladores a encorajar a diminuição do consumo de energia, cuja geração está intimamente ligada a diversas questões ambientais. Este encorajamento se tornou um incentivo às pesquisas de métodos para a redução do consumo de energia, principalmente nos setores onde os maiores consumos são observados, que inclui o setor de manufatura. Especificamente o processo de usinagem, é responsável por grande carga ambiental associada tanto ao consumo de energia, quanto aos fluidos de corte utilizados e outros fatores. Uma forma de tornar os processos de usinagem mais sustentáveis é mediante a redução do consumo de energia, que pode ser obtida reduzindo-se o caminho percorrido pela da ferramenta de corte. Este trabalho fornece uma avaliação do consumo de energia durante o processo de fresamento de cavidades com duas ferramentas para diferentes trajetórias. A geração das trajetórias foi realizada utilizando-se um software CAM (Manufatura Assistida por Computador) e três tipos trajetórias foram geradas para comparação, sendo elas: paralela ao contorno, zigzague e uma combinação de trajetória trocoidal e paralela ao contorno. As trajetórias estudadas apresentaram uma variação significativa no consumo total de energia ativa para cada uma das ferramentas. Os resultados comprovam a importância de gerar trajetórias que diminuam o caminho percorrido pela ferramenta e o tempo de usinagem, além de destacar a necessidade da seleção adequada dos parâmetros de corte e das demais variáveis envolvidas na usinagem, de maneira a tornar o processo mais sustentável.

Palavras-chave: Fresamento de Cavidades, Consumo de Energia, Manufatura Sustentável, Geração de Trajetórias de Usinagem.

ABSTRACT

The increase in population, coupled with the increasing scarcity of natural resources has increased the intensity of environmental impacts. These factors have led to an increase in social consciousness, forcing regulators to encourage the reduction of energy consumption, whose generation is closely linked to several environmental issues. This encouragement has become an incentive to research methods for reducing energy consumption, especially in sectors where the greatest consumption are observed, including the manufacturing sector. Specifically the machining process, is responsible for much environmental burden associated with both energy consumption, the cutting fluid used and other factors. One way to make the most sustainable machining processes is by reducing energy consumption, which can be obtained by reducing the path of the cutting tool. This paper provides an assessment of energy consumption during the cavity milling process with two tools for different paths. The generation of trajectories was performed using a software CAM (Computer Aided Manufacturing) and three types of trajectories were generated for comparison, these being: parallel to the contour, zigzag and a combination of trochoidal and parallel to the contour. The trajectories studied showed a significant variation in the total consumption of active power for each tool. The results prove the importance of generating trajectories that reduce the path taken by the tool and the machining time, and highlight the need for proper selection of cutting parameters and other variables involved in the machining process, in order to make it more sustainable.

Keywords: Pocket Milling, Energy Consumption, Sustainable Manufacturing, Tool Path Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os três fundamentos da sustentabilidade.....	28
Figura 2 - Ciclo de Vida do Material	29
Figura 3 - Classificação dos processos de fresamento: (a) fresamento tangencial (b) fresamento frontal	32
Figura 4 - Movimentos em operações de fresamento: (a) movimento concordante (b) movimento discordante	33
Figura 5 - Direções das velocidades e movimentos de corte, avanço e efetivo.....	34
Figura 6 - Forças de usinagem e suas componentes na operação de fresamento	36
Figura 7 - Influências de algumas variáveis de trabalho nas componentes básicas da força de usinagem	37
Figura 8 - Tipos de fresas de acordo com sua construção: (a) fresa com insertos intercambiáveis e (b) fresa inteiriça.....	39
Figura 9 - Regiões em que o calor é gerado na usinagem.	41
Figura 10 - Direções de aplicação do fluido de corte.....	43
Figura 11 - Tipos de entrada da ferramenta na peça: (a) em mergulho; (b) em rampa e (c) em hélice.....	46
Figura 12 - Tipos de trajetórias paralelas a uma direção: (a) unidirecional e (b) ziguezague	48
Figura 13 - Direções das trajetórias paralelas a uma direção: (a) na direção horizontal, e (b) direção ótima.....	49
Figura 14 - Exemplo de trajetória paralela ao contorno	49
Figura 15 - Procedimento de geração de <i>offsets</i> para a usinagem de cavidades com ilhas.....	50
Figura 16 - Movimento da ferramenta em uma trajetória trocoidal.	51
Figura 17 - Parâmetros envolvidos na geração de trajetórias trocoidais	52
Figura 18 - Exemplo de trajetória espiralar	53
Figura 19 - Tempo de processamento e consumo de energia de trajetórias paralelas a uma direção e espiralares.....	54
Figura 20 - Etapas estabelecidas para a realização deste trabalho.....	55
Figura 21 - Bloco de aço AISI P20 preparado para a usinagem.....	56
Figura 22 - Fresa com 40 mm de diâmetro.....	57
Figura 23 - Fresa com 20 mm de diâmetro.....	58
Figura 24 - Inseto de metal-duro utilizado nos ensaios.....	59
Figura 25 – Vista isométrica da cavidade usinada nos ensaios	60
Figura 26 – Vista superior da região usinada pela fresa de 40 mm.....	60
Figura 27 – Região ‘A’ usinada pela ferramenta de 40 mm, e região ‘B’ usinada pela ferramenta de 20 mm.....	61

Figura 28 - Trajetória paralela ao contorno: (a) percorrida pela fresa de 40 mm e (b) percorrida pela fresa de 20 mm	62
Figura 29 - Trajetória zigzague: (a) percorrida pela fresa de 40 mm e (b) percorrida pela fresa de 20 mm	63
Figura 30 - Trajetória trocoidal paralela ao contorno: (a) percorrida pela fresa de 40 mm e (b) percorrida pela fresa de 20 mm.....	65
Figura 31 – Zoom da trajetória trocoidal para a ferramenta de 20 mm.	66
Figura 32 - Comparação entre os comprimentos das trajetórias geradas	66
Figura 33 - Tempos de usinagem de cada trajetória.....	67
Figura 34 – Equipamento para medição de energia: (a) transdutor de grandezas elétricas e (b) conversor KR-485/USB.....	70
Figura 35 - Esquema do sistema de medição de energia.....	72
Figura 36 – Escopo da conexão entre a máquina-ferramenta e o dispositivo de medição de energia	72
Figura 37 - Sequência de etapas adotada para realizar os ensaios	74
Figura 38 – Comparação entre os consumos de energia ativa total e em vazio para cada trajetória percorrida pela ferramenta de 40 mm de diâmetro	77
Figura 39 – Consumo de energia durante o movimento de corte com a ferramenta de 40 mm para cada trajetória.....	78
Figura 40 – Relação entre consumo total de energia e tempo gastos na usinagem com a ferramenta de 40 mm para cada trajetória	79
Figura 41 – Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória paralela ao contorno	80
Figura 42 - Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória zigzague..	81
Figura 43 - Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória trocoidal e paralela ao contorno.....	81
Figura 44 – Comparação entre as potências médias requeridas para os ensaios de cada trajetória com a ferramenta de 40 mm de diâmetro.....	82
Figura 45 – Comparação entre os consumos de energia ativa total e em vazio para cada trajetória percorrida pela ferramenta de 40 mm de diâmetro	83
Figura 46 - Consumo de energia ativa durante o movimento de corte com a ferramenta de 20 mm para cada trajetória	84
Figura 47 – Relação entre consumo de energia e tempo gastos na usinagem com a ferramenta de 20 mm para cada trajetória.....	85

Figura 48 - Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória paralela ao contorno.....	86
Figura 49 – Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória ziguezague ..	87
Figura 50 - Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória combinada trocoidal e paralela ao contorno	88
Figura 51 – Comparação entre as potências médias requeridas para os ensaios de cada trajetória com a ferramenta de 20 mm de diâmetro	89
Figura 52 - Cavidades usinadas pela fresa de 40 mm com as trajetórias: (a) paralela ao contorno, (b) trocoidal e (c) ziguezague	91
Figura 53 - Áreas fresadas com a fresa de 40 mm de diâmetro usinadas por cada ferramenta durante os ensaios (região mais profunda) e pela fresa de 20 mm de diâmetro em trajetória trocoidal.....	92
Figura 54 – Cavidades finalizadas com a fresa de 20 mm usinadas com as trajetórias paralela ao contorno (a), ziguezague (b) e trocoidal (c)...	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos processos de usinagem	30
Tabela 2 - Classificação dos materiais para ferramentas de corte de geometria definida.....	40
Tabela 3 - Classificações, composições e propriedades dos fluidos de corte.....	43
Tabela 4 – Características do material ensaiado.....	56
Tabela 5 – Características e dimensões do suporte com 40mm de diâmetro.....	57
Tabela 6 - Dimensões do suporte com 20 mm de diâmetro	58
Tabela 7 - Características e dimensões do inserto de metal-duro.....	59
Tabela 8 - Características da fresadora Charles MVC-955	68
Tabela 10 - Características do conversor KR-485/USB.....	70
Tabela 9 - Características do transdutor Mult-K 120	71
Tabela 11 - Parâmetros de corte utilizados para o suporte Kyocera com 40 mm de diâmetro.....	75
Tabela 12 - Parâmetros de corte utilizados para o suporte Casa do Torneiro com 20 mm de diâmetro.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
<i>apud</i>	Citado em, conforme ou segundo
CA	Corrente Alternada
CAD	<i>Computed Aided Design</i>
CAM	<i>Computed Aided Manufacturing</i>
CBN	<i>Cubic Boron Nitride</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
EPI	Equipamento de proteção individual
et al	Mais de dois autores
GRIMA	Grupo de Integração da Manufatura
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UGS NX	Unigraphics NX
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USICON	Laboratório de Usinagem e Comando Numérico

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

a_e	[mm]	Penetração de trabalho
a_f	[mm]	Penetração de avanço
a_p	[mm]	Profundidade de corte
D	[mm]	Diâmetro da ferramenta
f	[mm]	Avanço
F_{ap}	[N]	Força de apoio
F_c	[N]	Força de corte
F_f	[N]	Força de avanço
F_n	[N]	Força de compressão
F_p	[N]	Força passiva
F_{TR}	[N]	Força ativa
F_u	[N]	Força de usinagem
f_z	[mm/dente]	Avanço por dente
n	[min ⁻¹]	Número de rotações da ferramenta
Q	[mm ³ /min]	Taxa de remoção de material
P_c	[kW]	Potência de corte
P_f	[kW]	Potência de avanço
TiAlN	[-]	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiN	[-]	Nitreto de Titânio
V_c	[m/min]	Velocidade de corte
V_e	[m/min]	Velocidade efetiva de corte
V_f	[mm/min]	Velocidade de avanço
Z_c	[-]	Número de dentes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos	24
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos	24
1.2	Estrutura do trabalho	25
2	REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1	Sustentabilidade	27
2.1.1	Manufatura Sustentável	28
2.2	Processos de usinagem	30
2.2.1	Fresamento	31
2.3	Parâmetros de corte no fresamento	33
2.3.1	Velocidades	33
2.3.2	Grandezas de corte	34
2.3.3	Forças e potências de corte	35
2.4	Ferramentas de corte empregadas no fresamento	38
2.4.1	Materiais para ferramentas de fresamento	39
2.5	Fluidos de corte	41
2.5.1	Classificações dos fluidos de corte	42
2.5.2	Direções e métodos de aplicação	43
2.5.3	Alternativas sustentáveis	44
2.6	Trajетórias para fresamento de cavidades	45
2.6.1	Trajетórias paralelas a uma direção	47
2.6.2	Trajетórias paralelas ao contorno	49
2.6.3	Trajетórias trocoidais	51
2.6.4	Trajетórias espiralares curvilíneas	52
3	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	Metodologia	55
3.1.1	Material ensaiado	55
3.1.2	Ferramentas de corte	57
3.1.3	Área a ser usinada por cada ferramenta	59
3.1.4	Geração das trajetórias	62
3.1.5	Simulação das trajetórias	67
3.2	Equipamentos	68
3.2.1	Máquina-ferramenta	68
3.2.2	Fluido de corte	69
3.2.3	Medição do consumo de energia	69
3.3	Tratamento de dados	73
3.4	Planejamento e execução experimental	73
3.4.1	Parâmetros de corte utilizados nos ensaios	75

4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
4.1	Consumo de energia	77
4.1.1	Desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro	77
4.1.2	Desbaste com a ferramenta de 20 mm de diâmetro	83
4.2	Análise da sustentabilidade dos processos	89
4.2.1	Aspecto social	89
4.2.2	Aspecto ambiental.....	90
4.2.3	Aspecto econômico.....	90
4.3	Geometrias obtidas	91
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS	
FUTUROS	.....	93
5.1	Conclusões	93
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	94
REFERÊNCIAS	.....	97
APÊNDICE A – Projeto da cavidade	.....	103
APÊNDICE B – Geração das Trajetórias	.....	105
APÊNDICE C - Desgaste dos Insertos	.....	117

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população, juntamente com a crescente escassez dos recursos naturais, vem aumentando a intensidade dos impactos ambientais. Estes fatores têm gerado um aumento na consciência social, forçando os órgãos reguladores a encorajar a diminuição do consumo de energia, cuja geração está intimamente ligada a diversas questões ambientais. Para Newman et al. (2012), este encorajamento se tornou um incentivo às pesquisas por métodos para a redução do consumo de energia, especialmente nos setores em que os maiores consumos são observados.

Yan e Li (2013) atribuem ao recente aumento na demanda de energia associado ao constante avanço tecnológico, e às restrições nas emissões de carbono firmadas em acordos, a priorização da economia de energia para o setor da manufatura do ponto de vista ambiental. Para Peng e Xu (2014) o setor da manufatura é a espinha dorsal de qualquer país desenvolvido, e enfrenta o desafio de se adaptar às questões ambientais. Muitas destas questões já são preocupações de empresas instaladas em países em desenvolvimento.

De acordo com Yan e Li (2013), os processos de usinagem são responsáveis por grande carga ambiental, e isto acontece porque, além do consumo de energia vinculado às emissões, existem os fluidos de corte e cavacos contaminados por estes fluidos que podem causar danos ao meio ambiente. Define-se o processo de usinagem como um processo de fabricação onde ocorre a remoção de material da peça. Os parâmetros dos processos de usinagem, como o tempo total de usinagem, a taxa de remoção de material, a vida da ferramenta, o consumo de energia, entre outros, podem ser otimizados.

Uma solução que pode tornar os processos de usinagem mais sustentáveis mediante a redução do consumo de energia é a redução do caminho percorrido pela da ferramenta de corte mediante a alteração da sua trajetória, que é o foco do trabalho proposto. Outro tópico que vem sendo cada vez mais investigado é a realização da usinagem sem fluido de corte.

Dentre os processos de usinagem está o fresamento, que consiste na remoção de material pelo movimento rotacional de uma ferramenta de corte que possui, normalmente, vários dentes. Devido à sua versatilidade o processo de fresamento é utilizado na fabricação de peças com geometrias complexas como, por exemplo, cavidades para moldes. Um dos materiais amplamente utilizados nesta aplicação é o aço AISI P20.

A trajetória da ferramenta durante o processo de fresamento é um fator de extrema importância, pois está diretamente relacionada com a qualidade do produto e com a duração do processo. As trajetórias mais utilizadas são a ziguezague e a paralela ao contorno, porém existem outras trajetórias conhecidas, como as trocoidais, helicoidais e espiralares, podendo ainda haver combinações de diferentes trajetórias.

A usinagem de cavidades 2½D consiste na remoção de material dentro de um perfil qualquer fechado movendo-se em uma superfície plana em uma profundidade fixa. As cavidades a serem fabricadas por usinagem podem conter protuberâncias, algumas vezes chamadas de “ilhas”.

Neste contexto, este trabalho propõe a comparação do consumo de energia de três trajetórias distintas e avaliar sua relação com os tempos de usinagem e o comprimento do caminho percorrido pela ferramenta. Além disso, mediante a análise dos desgastes das ferramentas pode-se viabilizar alterações das trajetórias utilizadas atualmente em ambientes industriais levando-se em consideração questões ambientais e econômicas.

1.1 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Busca-se neste trabalho comparar a energia elétrica consumida no processo de fresamento de cavidades 2½D por três diferentes trajetórias de ferramenta, sendo elas paralela ao contorno, ziguezague, e uma combinação de trajetória paralela ao contorno e trocoidal. Faz-se uma comparação de cada trajetória estudada e a análise dos processos em termos de sustentabilidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir a área a ser usinada por cada ferramenta;
- Gerar as trajetórias propostas para o processo de fresamento da cavidade especificada;
- Realizar a simulação computacional das trajetórias geradas;
- Preparar o sistema de medição e aquisição de dados do consumo de energia;

- Realizar ensaios de usinagem para cada trajetória gerada visando obter dados reais dos consumos de energia que elas apresentam;
- Analisar os dados obtidos sobre o consumo de energia;
- Comparar as trajetórias em termos de consumo de energia elétrica;
- Analisar os resultados em termos de sustentabilidade.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: apresenta conceitos de manufatura sustentável, usinagem e geração de trajetórias utilizados no decorrer do estudo realizado;

Capítulo 3 – Materiais e métodos: apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, todos os materiais utilizados na realização dos ensaios, além do planejamento do experimento, da geração das trajetórias propostas e do método de medição de consumo de energia adotado.

Capítulo 4 – Apresentação e análise dos resultados: apresenta os resultados de consumo de energia obtidos por meio da realização dos ensaios e a análise de sustentabilidade feita a partir dos resultados obtidos.

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros: finalmente são apresentadas as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada um referencial teórico dos assuntos pertinentes ao consumo de energia em processos de usinagem. Deste modo, são descritos os conceitos de sustentabilidade e manufatura sustentável, as características dos processos usinagem, os parâmetros para o fresamento e, finalmente, as trajetórias conhecidas para o fresamento de cavidades.

2.1 Sustentabilidade

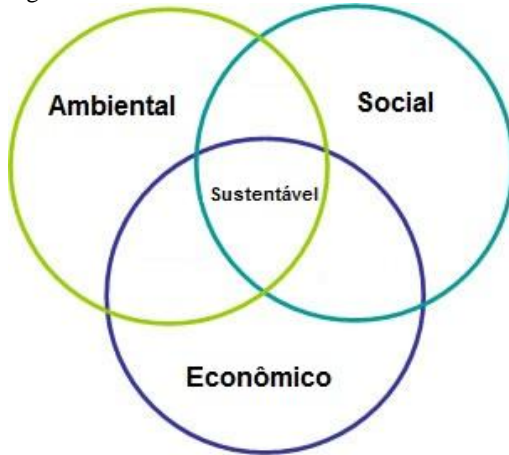
A sustentabilidade pode ser definida como a adoção de estratégias e ações que atendem as necessidades das empresas enquanto protegem, mantém e melhoram recursos humanos e naturais (Labuschagne et al., 2005). Segundo Clift (2000) *apud* Sikdar (2003), a sustentabilidade pode ser considerada o objetivo a ser alcançado, enquanto o desenvolvimento sustentável é o processo para alcançá-la.

De acordo com Labuschagne et al. (2005), uma abordagem consistente com os princípios básicos e requisitos da sustentabilidade já foi proposta para garantir um desenvolvimento sustentável em nível empresarial. Ainda segundo o referido autor, esta abordagem tenta contemplar os seguinte fatores:

- Englobar a sustentabilidade social e ecológica no nível inicial básico;
- Transferir a definição de sustentabilidade para o nível institucional;
- Gerenciar a perspectiva estratégica por meio de uma abordagem passo-a-passo, onde o desempenho econômico é levado em consideração apesar dos riscos a curto e longo prazo;
- Propor o desenvolvimento de indicadores que tenham esta perspectiva;
- Mostrar o quanto as várias iniciativas sob este cenário estão relacionadas com uma perspectiva sustentável.

Neste contexto, Sikdar (2003) expõe que o desenvolvimento sustentável pode ser visto como um balanço entre o desenvolvimento econômico, gestão ambiental e igualdade social. Este conceito também é apresentado por Peng e Xu (2014), o qual é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Os três fundamentos da sustentabilidade



Fonte: Adaptado de Peng e Xu (2014)

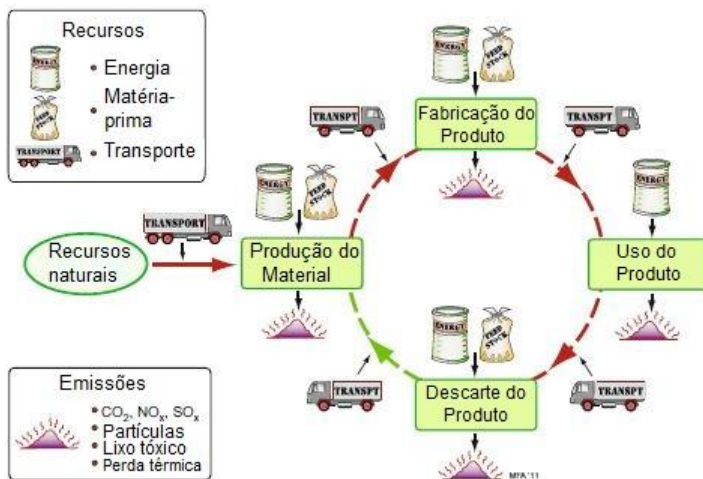
Para Viegas e Salles (2012), o intuito de se adotar um desenvolvimento sustentável consiste em garantir a qualidade de vida para as gerações atuais e futuras, sem destruir sua base de sustentação, que é o meio ambiente.

2.1.1 Manufatura Sustentável

O conceito de manufatura sustentável surgiu em 1992 na conferência “*United Nations Conference on Environment and Development*” (UNCED, 1992 *apud* Silva et al., 2011). A manufatura sustentável é definida como a criação de produtos e serviços utilizando processos e sistemas que não sejam poluentes, que economizem energia e recursos naturais, que sejam economicamente viáveis, que sejam seguros e saudáveis para os trabalhadores, comunidades e consumidores, e que sejam socialmente e criativamente gratificantes para todos os trabalhadores (Veleva et al., 2001).

Segundo Ashby (2013), o consumo de energia é parte integrante de todo o ciclo de vida de um material, desde a produção do material, a manufatura do produto, seu uso e, finalmente, o seu descarte. Na Figura 2 um exemplo do ciclo de vida de um material é apresentado. Nela pode-se observar o consumo de energia em todas as etapas deste ciclo. Além disso, há diversos tipos de emissões como saídas em cada uma destas etapas, inclusive no processo de manufatura do produto.

Figura 2 - Ciclo de Vida do Material



Fonte: Adaptado de Ashby (2013)

Silva et al. (2011) justificam a necessidade da adoção da manufatura sustentável com a exigência de modificações nos sistemas de produção que a sociedade atual tem feito. Eles ainda afirmam que é preciso observar os elementos deste processo sob a ótica da sustentabilidade em todas as etapas citadas anteriormente. Além disso, segundo os autores, elementos de entrada como recursos naturais e energia precisam ser reduzidos ou substituídos visando o menor consumo.

Uma lista dos benefícios apresentados ao melhorar a sustentabilidade dos processos de manufatura foi apresentada por Linde e Porter (1995). Estes benefícios são listados a seguir:

- Economia de materiais pelo melhoramento do processo, substituição, reuso e reciclagem de entradas para a produção;
- Aumento da capacidade do processo;
- Menor tempo de parada devido ao monitoramento e manutenção mais cuidadosa;
- Melhor utilização de subprodutos;
- Conversão de resíduos em itens mais valiosos;
- Menor consumo de energia durante o processo de produção;
- Menores custos de manipulação e estocagem;
- Ganhos em razão do ambiente de trabalho mais seguro; e
- Eliminação ou diminuição dos custos das atividades envolvidas

no descarte ou manipulação de materiais e transporte.

Como pode-se observar, as melhorias apresentadas ocorrem em todos os três aportes da sustentabilidade, realçando mais uma vez a importância da manufatura sustentável.

2.2 Processos de usinagem

O processo de usinagem é definido como a operação que confere a uma peça forma, dimensão, acabamento ou a combinação qualquer destes três itens mediante a remoção de material, conhecida como cavaco.

Machado et al. (2009) classificam os processos de usinagem como convencionais e não-convencionais, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos processos de usinagem

	Convencional		Não-convencional
	Geometria Definida	Geometria Não-Definida	
Processo de Usinagem	Torneamento	Retificação	Feixe de Elétrons
	Fresamento	Brunimento	Eletroquímica
	Furação	Lapidação	Eletroerosão
	Aplainamento	Lixamento	Jato D'água
	Serramento	Polimento	Química
	Brochamento	Jateamento	LASER
	Roscamento		Plasma
	Alargamento		Ultrassom
			Jato Abrasivo

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2009)

Os processos convencionais de usinagem são subdivididos entre os processos de usinagem com ferramenta de geometria definida e com ferramenta de geometria não-definida.

Na usinagem com ferramentas de geometria não-definida o material da peça é removido por meio dos gumes de grãos abrasivos, enquanto na usinagem com ferramenta de geometria definida o material é removido por gumes afiados e bem definidos da ferramenta de corte.

Segundo Machado et al. (2009), o princípio usado na usinagem para se obter o resultado final desejado é garantir a realização de um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008), os movimentos na usinagem podem ser classificados como ativos e passivos. Na reali-

zação de movimentos ativos há a remoção de material e eles são divididos em:

- **Movimento efetivo de corte:** é a componente resultante da soma vetorial dos movimentos de corte e avanço;
- **Movimento de corte:** é o movimento na direção da velocidade de corte. A velocidade de corte pode ser executado pela peça (torneamento) ou pela ferramenta (fresamento, furação);
- **Movimento de avanço:** é o movimento na direção da velocidade de avanço.

Na realização dos movimentos passivos não há remoção de cavaco, porém estes são essenciais para a realização do processo. São eles:

- **Movimento de ajuste:** movimento no qual é pré-determinada a espessura da camada de material a ser removida;
- **Movimento de correção:** movimento empregado para compensar alterações de posicionamento da ferramenta;
- **Movimento de aproximação:** movimento no qual a ferramenta é aproximada da peça, antes do início da usinagem;
- **Movimento de recuo:** movimento no qual a ferramenta é afastada da peça após a usinagem.

Na usinagem o corte pode ser contínuo ou interrompido. Um exemplo de corte contínuo é processo de torneamento, no qual a ferramenta de corte possui um gume que retira material da peça continuamente ao longo de todo o percurso de avanço.

Já o corte interrompido pode ser observado em processos como o fresamento, no qual a remoção de cavaco é feita apenas durante o engajamento do gume no corte, em pequenas quantidades a cada rotação da ferramenta de corte. No corte interrompido o gume da ferramenta passa por uma fase ativa onde ocorre remoção de material, e por uma fase inativa onde não há remoção de material.

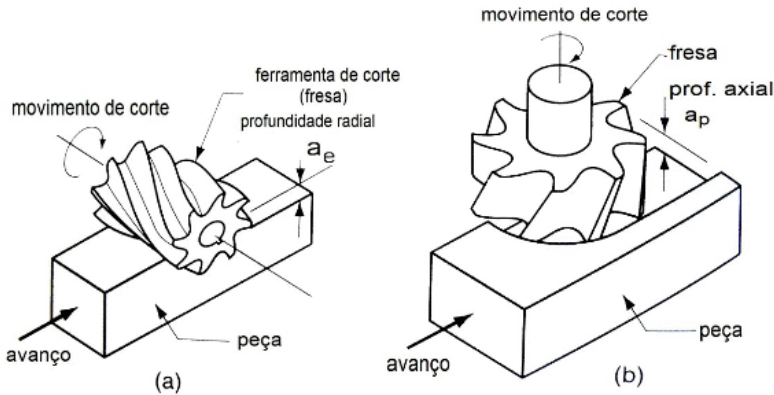
2.2.1 Fresamento

O fresamento é definido como um processo mecânico de fabricação no qual a remoção do cavaco é realizada por ferramentas normalmente multicortantes que realizam um movimento de rotação juntamente com o deslocamento da peça ou da própria ferramenta, ao longo de uma trajetória. A ferramenta de corte deste processo é denominada fresa.

Para Sandvik-Coromant (2010), o fresamento é o método de usinagem mais flexível, podendo gerar praticamente qualquer formato de superfície na peça. Outro fator importante observado pelo autor quanto ao processo de fresamento é a grande quantidade de variáveis que são incorporadas ao processo, que tornam difícil a sua otimização.

Segundo Ferraresi (1973), os processos de fresamento são classificados de acordo com a disposição dos dentes ativos (gumes) da fresa. Eles podem ser tangenciais, quando o eixo da fresa é paralelo à superfície gerada, e frontais, quando o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada. Esses tipos de fresamento são ilustrados na Figura 3a e 3b.

Figura 3 - Classificação dos processos de fresamento: (a) fresamento tangencial (b) fresamento frontal

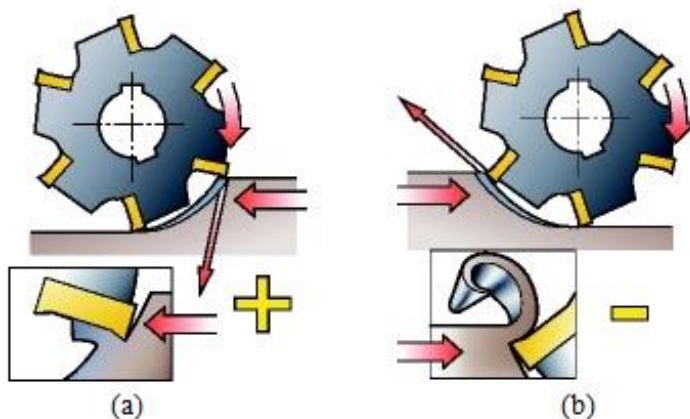


Fonte: Adaptado de Motta (2014)

Além disso, as fresas podem operar de duas formas: com movimento concordante e com movimento discordante.

O movimento concordante ocorre quando o vetor velocidade de corte e o vetor velocidade de avanço são concordantes. Caso estes vetores sejam opostos o movimento é discordante. Ilustrações de fresamento concordante e discordante são apresentadas na Figura 4a e 4b, respectivamente.

Figura 4 - Movimentos em operações de fresamento: (a) movimento concordante (b) movimento discordante



Fonte: Sandvik-Coromant (2015)

Além de compreender os conceitos relacionados ao processo de fresamento, é preciso entender outros aspectos envolvidos neste processo, como os parâmetros de corte, que são apresentados a seguir.

2.3 Parâmetros de corte no fresamento

A seguir são apresentados os principais parâmetros de corte relacionados ao processo de fresamento, segundo Ferraresi (1970), Sandvik-Coromant (2010), Schroeter e Weingaetner (2002) e Melo (2014).

2.3.1 Velocidades

- **Velocidade de corte (V_c):** velocidade com que o gume da ferramenta penetra o material, calculada em m/min. Pode ser obtida pela Equação (1).

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

Onde:

n : número de rotações da ferramenta [min^{-1}]

D : Diâmetro da ferramenta [mm]

- **Velocidade de avanço (V_f):** velocidade instantânea da ferramenta na direção e sentido do avanço, calculada em m/min. Pode ser obtida pela Equação (2).

$$V_f = f \cdot n \quad (2)$$

Onde:

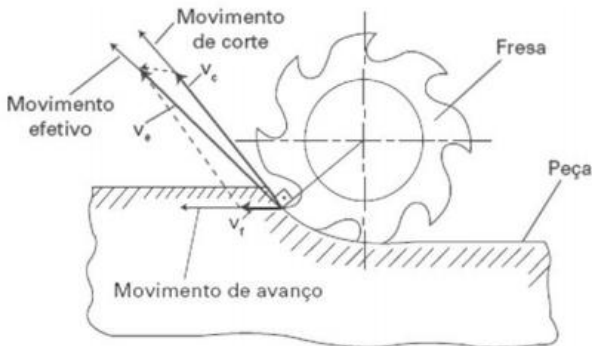
n : número de rotações da ferramenta [min^{-1}]

f : avanço [mm]

- **Velocidade efetiva de corte (V_e):** velocidade instantânea do ponto de referência do gume da ferramenta na direção efetiva de corte.

Na Figura 5 é apresentada uma ilustração das direções das velocidades e movimentos de corte, de avanço e efetivo.

Figura 5 - Direções das velocidades e movimentos de corte, avanço e efetivo



Fonte: Melo (2014)

2.3.2 Grandezas de corte

- **Avanço por dente (f_z):** distância em que a ferramenta avança entre cada gume, calculada em mm/dente. Utilizando-se a Equação (3) obtém-se o valor do avanço por dente.

$$f_z = \frac{V_f}{n \cdot Z_c} \quad (3)$$

Onde:

V_f : velocidade de avanço [mm/min]

n : número de rotações da ferramenta [min⁻¹]

Z_c : número de dentes

- **Avanço (f):** percurso de avanço em cada volta, calculado em mm. Pode ser obtido pela Equação (4).

$$f = f_z Z_c \quad (4)$$

Onde:

f_z : avanço por dente [mm/dente]

Z_c : número de dentes

- **Profundidade de corte (a_p):** é a profundidade de penetração do gume principal.
- **Penetração de trabalho (a_e):** penetração da ferramenta em relação à peça numa direção perpendicular à direção do avanço.
- **Penetração de avanço (a_f):** penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção de avanço.
- **Taxa de remoção de material (Q):** volume de metal removido, calculada em mm³/min. Seu valor é obtido mediante a Equação (5).

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times V_f}{1000} \quad (5)$$

Onde:

a_p : profundidade de corte [mm]

a_e : penetração de trabalho [mm]

V_f : velocidade de avanço [mm/min]

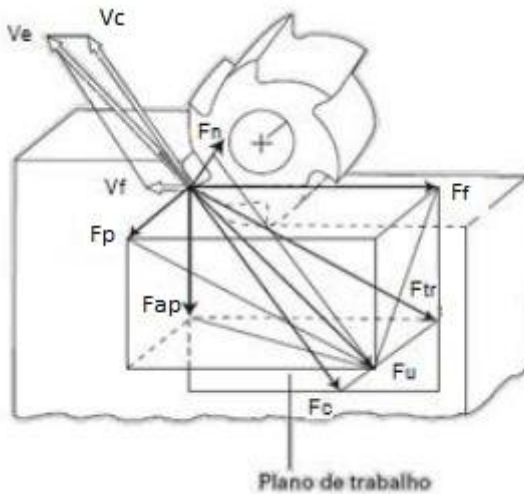
2.3.3 Forças e potências de corte

Conhecer os esforços de corte nos processos de usinagem é fundamental, pois segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), eles afetam

a potência necessária para o corte, a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta.

As forças de usinagem são ações da peça sobre a ferramenta, sendo a força de usinagem (F_u) a resultante que atua sobre a cunha de corte durante este processo. De acordo com Machado et al. (2009), a força de usinagem possui uma série de componentes apresentados na Figura 6.

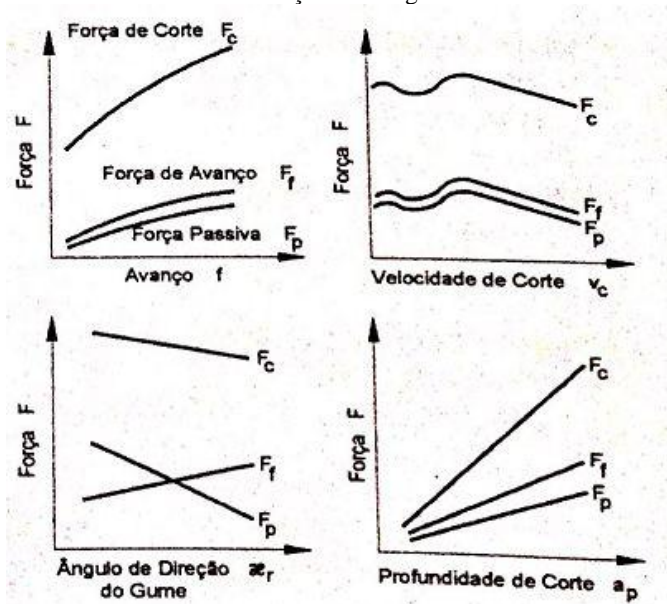
Figura 6 - Forças de usinagem e suas componentes na operação de fresamento



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2008)

Os três componentes básicos da força de usinagem (F_u) são a força de corte (F_c), a força de avanço (F_r) e a força passiva (F_p). Os demais componentes apresentados são a força ativa (F_{TR}), a força de compressão (F_n) e a força de apoio (F_{ap}). Na Figura 7 são apresentadas as influências de algumas variáveis de trabalho nas componentes básicas da força de usinagem.

Figura 7 - Influências de algumas variáveis de trabalho nas componentes básicas da força de usinagem



Fonte: Schroeter e Weingaetner (2002)

Para girar o seu eixo-árvore e realizar os movimentos de corte e avanço, é necessária que uma potência seja gerada pela máquina-ferramenta. A partir disto, Diniz, Marcondes e Coppini (2008) estabelecem as seguintes relações:

- **Potência de corte (P_c):** obtido pela Equação (6) em kW.

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} \quad (6)$$

Onde:

F_c : força de corte [N]

V_c : velocidade de corte [m/min]

- **Potência de avanço (P_f):** obtido pela Equação (7) em kW

$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \quad (7)$$

Onde:

F_f : força de avanço [N]

V_f : velocidade de avanço [mm/min]

Peng e Xu (2014) apresentam algumas formas de se obter valores de consumo de energia nos processos de usinagem, como modelos teóricos, feitos a partir de equacionamentos que envolvem as forças de corte do processo, e modelos empíricos, utilizando-se coeficientes obtidos a partir de ensaios experimentais.

Estes dados também podem ser obtidos experimentalmente através do consumo de tensão e corrente elétrica, conforme apresentado por Machado et al. (2009). Para utilizar esta abordagem é necessário que equipamentos específicos sejam utilizados.

Além dos valores de potência consumida durante o processo, é importante uma avaliação da eficiência energética a fim de reduzir a utilização de recursos, conforme apresentado por Carvalho (2015).

2.4 Ferramentas de corte empregadas no fresamento

Stemmer (1995) define as ferramentas de corte utilizadas no processo de fresamento como sendo ferramentas rotativas, que normalmente possuem múltiplos gumes dispostos simetricamente ao redor de um eixo e que removem material da peça intermitentemente.

O mesmo autor estabelece alguns critérios para classificar estas ferramentas, um deles é quanto à sua construção. De acordo com a classificação das fresas segundo a sua construção, estas podem ser inteiriças, com insertos brasados ou com insertos intercambiáveis. Na Figura 8 são apresentados dois tipos de fresa classificadas de acordo com a sua construção.

A ferramenta da Figura 8a é uma fresa com insertos intercambiáveis, que é o tipo de ferramenta mais utilizados atualmente por garantirem trocas rápidas e seguras dos insertos. Nestas ferramentas os insertos são fixados, normalmente, com parafusos.

A fresa inteiriça é representada na Figura 8b, na qual é possível observar que parte cortante da ferramenta é feita de um material só.

Nas fresas com insertos brasados a fixação dos insertos é feita por meio de brasagem no corpo da ferramenta. O material do corpo da ferramenta e dos insertos são diferentes.

Figura 8 - Tipos de fresas de acordo com sua construção: (a) fresa com insertos intercambiáveis e (b) fresa inteiriça



Fonte: Sandvik-Coromant (2015)

2.4.1 Materiais para ferramentas de fresamento

Diniz, Marcondes e Coppini (2008) estabelecem que os principais fatores que devem ser ponderados para uma seleção criteriosa do material da ferramenta são:

- Material a ser usinado: dureza e tipo de cavaco formado;
- Processo de usinagem;
- Condição da máquina-ferramenta: potência, velocidades e estado de conservação;
- Forma e dimensão da ferramenta;
- Custo do material da ferramenta;
- Parâmetros de corte: velocidades de corte, avanço e profundidade de corte;
- Condições de operação: corte contínuo ou interrompido e sistema de fixação rígido.

Para Machado et al. (2009) as propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte são:

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fadiga;
- 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.

Como não é possível reunir todas estas propriedades em um único material, algumas dessas propriedades são priorizadas no momento da seleção de acordo com sua aplicação.

Os materiais para ferramentas de geometria definida são classificados por Schroeter e Weingaertner (2002) conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos materiais para ferramentas de corte de geometria definida

Materiais para Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida			
Materiais Metálicos	Materiais de Ligação	Materiais Cerâmicos	
Aço-ferramenta Aço-rápido	Metal-duro Cermets	Cerâmicas de corte	Materiais de altíssima dureza
		Cerâmica óxida Cerâmica não-óxida	Diamante CBN

Fonte: Adaptado de Schroeter e Weingaertner (2002)

O metal-duro é o material de ferramenta mais largamente utilizado na indústria atualmente (Schroeter e Weingaertner, 2002). Entre as vantagens de se utilizar este material estão a possibilidade de utilizar insertos intercambiáveis, variedade de tipos obtidos ao alterar os elementos de liga, e a obtenção de propriedades diferentes conforme a aplicação com o uso de revestimentos.

Ele foi desenvolvido pela empresa Krupp que deu nome WIDIA ao novo material de corte, devido a sua elevada dureza. Ele pode ser definido como um produto da metalurgia do pó, feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais materiais do grupo do ferro, formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. Em outras palavras, os metais-duros são materiais compostos, onde um constituinte é um ligante metálico dúctil (cobalto ou níquel) e o outro é um carboneto de metais de transi-

ção. A função do primeiro componente é garantir a ligação dos carbonetos frágeis, enquanto a função do segundo é garantir a dureza e a resistência ao desgaste (Schroeter e Weingaertner, 2002).

A ferramenta de metal-duro quando revestida pode apresentar um desempenho muito superior à ferramenta sem revestimento. O aumento da aplicação de ferramentas de metal-duro nos últimos anos teve contribuição do maior domínio das técnicas de revestimento, o que gerou ferramentas com melhores propriedades e menores custos (Machado et al., 2009). As técnicas de revestimento utilizadas são conhecidas como CVD (deposição química de vapor) e PVD (deposição física de vapor).

De acordo com Machado et al. (2009), os metais-duros são divididos por classes, sendo a classe P recomendada à usinagem de aços.

2.5 Fluidos de corte

Durante o processo de usinagem uma grande quantidade de calor é gerada. O calor gerado é gerado em três regiões distintas, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Regiões em que o calor é gerado na usinagem.



Fonte: Machado et al. (2009)

A região A é a zona de cisalhamento, na qual é gerada a maior parcela de calor na raiz do cavaco devido ao trabalho de cisalhamento e corte do material da peça. Na região B o calor é gerado por cisalhamento em uma fina camada e atrito entre o cavaco e a face da ferramenta. Na região C a fonte de calor é apenas o atrito entre o cavaco e a face ferra-

menta. Finalmente, na região D o atrito entre o flanco da ferramenta e a peça é o que gera o calor.

Na usinagem com ferramenta de corte de geometria definida, para a velocidade de corte de 60 m/min, aproximadamente 75% do calor gerado na raiz de cavaco vai para o cavaco, 18% para a ferramenta e 7% para a peça (Kronenberg, 1966 *apud* König e Klocke, 2007). Para um aumento da velocidade de corte, a quantidade de calor que vai para o cavaco aumenta, reduzindo a quantidade de calor conduzido para a peça e para a ferramenta. As temperaturas de contato são dependentes da velocidade de corte e aumentam com o aumento da velocidade de corte.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008), as altas temperaturas alcançadas durante o processo devem ser evitadas e/ou reduzidas para que o desgaste da ferramenta e a dilatação térmica da peça sejam minimizados. A maioria dos mecanismos de desgaste é de origem térmica, e alguns mecanismos de origem mecânica, como a deformação plástica do gume, também são influenciados pela temperatura (SILVA et al., 2007).

Neste contexto, Machado et al. (2009) estabelecem que as principais funções dos fluidos de corte são:

- Lubrificação em baixas velocidades de corte;
- Refrigeração em altas velocidades de corte;
- Remoção dos cavacos da zona de corte;
- Proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação.

A ação lubrificante diminui o atrito envolvido no processo, enquanto a ação refrigerante auxilia na dissipação do calor gerado quando o fluido é aplicado nas regiões de contato.

A remoção do cavaco da zona de corte procura evitar que o mesmo entre em contato com a ferramenta no momento do corte, podendo causar sua falha prematura. Esta função é mais importante em alguns processos específicos, como furação profunda, mas é observada em todos os processos que utilizam fluido de corte.

2.5.1 Classificações dos fluidos de corte

Por existirem diversos tipos de fluidos de corte, Lisboa, Moraes e Hirashita (2013) unificaram algumas classificações existentes na literatura. Na Tabela 3 são apresentadas as classificações, composições e propriedades dos principais fluidos de corte.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), os principais fatores para a seleção do fluido de corte adequado são o material da peça, as condições de usinagem, o material da ferramenta e a operação de usinagem.

Tabela 3 - Classificações, composições e propriedades dos fluidos de corte.

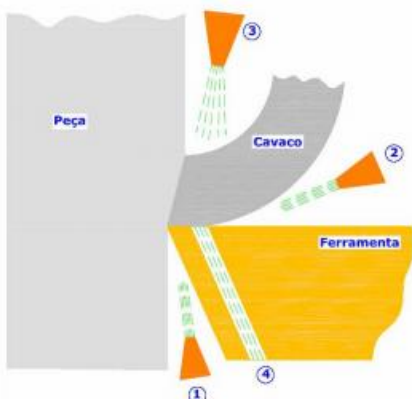
Classificação	Sólido	Líquido			Gasoso	
		Não solúveis em água	Solúveis em água			
		Óleos	Emulsões	Sintéticos		
Composições	Grafite e Bisulfeto de Molibdênio	óleo mineral e/ou óleo graxo e aditivos	Água, agentes emulsificantes e aditivos	Água, sais orgânicos, inorgânicos e aditivos	Ar comprimido	Nitrogênio Dióxido de carbono
Propriedades	Lubrificação	Lubrificação Anticorrosão	Refrigeração Antioxidação	Refrigeração Antioxidação Fácil remoção	Remoção de cavacos	Refrigeração Antioxidação

Fonte: Adaptado de Lisboa, Moraes e Hirashita (2013)

2.5.2 Direções e métodos de aplicação

Além de selecionar o fluido de corte adequado, deve-se também selecionar a sua direção e seu método de aplicação. Na Figura 10 são apresentadas as quatro direções de aplicação de fluidos de corte segundo Almeida et al. (2007).

Figura 10 - Direções de aplicação do fluido de corte



Fonte: Almeida et al. (2007)

De acordo com Machado et al. (2009), a direção 1 tem como vantagem atingir diretamente a interface ferramenta/peça, o que reduz o desgaste de flanco e melhora a qualidade da superfície usinada, além de estar mais protegida dos cavacos do que as outras posições. Porém, nesta posição, o fluido não auxilia na remoção de cavaco e grande parte do calor gerado no processo é transmitido do cavaco para a ferramenta.

Na direção 2 o fluido é aplicado entre a ferramenta e o cavaco. Sua desvantagem é que o fluido é aplicado no sentido contrário ao movimento do cavaco. O referido autor recomenda que o fluido seja aplicado sob elevada pressão.

A direção 3, onde o fluido é aplicado entre o cavaco e a peça, é a mais comum. Ainda segundo Machado et al. (2009), esta direção de aplicação é a mais comum devido à rigidez e aos poucos graus de liberdade dos primeiros sistemas de aplicação. Esta direção não é adequada quando há a presença de cavacos emaranhados, pois eles dificultam o acesso do fluido à interface ferramenta/cavaco.

Na direção 4 o fluido é aplicado na interface ferramenta/cavaco através da ferramenta. Este tipo de aplicação é utilizado normalmente em processos de furação, para facilitar a remoção do cavaco da região de corte.

Machado et al. (2009) divide os métodos de aplicação dos fluidos de corte em três tipos:

- Jorro a baixa pressão;
- Sistema a alta pressão;
- Atomização ou mínima quantidade de fluido (MQF).

O jorro a baixa pressão é o mais utilizado por ser o mais simples. O sistema a alta pressão requer equipamentos mais complexos. Já a atomização apresenta menores quantidades de fluido utilizadas, porém requer um sistema de aplicação diferenciado. De acordo com Neves (2013), a técnica MQF tem como princípio a utilização de pequenas quantidades de fluido fornecido ao gume por ar comprimido, que contribui significativamente para reduzir o atrito no corte.

2.5.3 Alternativas sustentáveis

A utilização de fluidos de corte apresenta diversas vantagens para os processos de usinagem, sendo indispensável em alguns deles. Porém, a usinagem com fluidos de corte também apresenta algumas desvanta-

gens. De acordo com Pereira et al. (2010), entre estas desvantagens estão risco à saúde dos operadores e os impactos ambientais.

Muitas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de diminuir ou eliminar a utilização de fluidos de corte, para diminuir os impactos ambientais e sociais de modo que não haja aumento nos custos da operação, tornando o processo mais sustentável.

As alternativas apresentadas por Neves (2013) são: (a) a técnica MQF, descrita de maneira sucinta anteriormente, utilizando-se ar comprimido; e (b) o corte a seco.

Segundo Neves (2013), a única função do ar comprimido sozinho como fluido de corte é a remoção de cavacos, já que à temperatura ambiente sua capacidade refrigerante e lubrificante são mínimas. De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008), o ar comprimido é utilizado especialmente no fresamento de rasgos e cavidades, pois nessas operações o cavaco pode voltar para a região de corte caso permaneça próximo à ferramenta, e causar a quebra da mesma.

No corte a seco nenhuma espécie fluido de corte é utilizado. Para Chetan, Ghosh e Rao (2015), a utilização da usinagem a seco ajuda a construir uma imagem “*eco-friendly*” da empresa por facilitar a reciclagem dos cavacos que não foram contaminados por óleos, e diminuir os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado destes fluidos. Esta técnica também melhora a satisfação dos funcionários, que não estão mais expostos aos efeitos nocivos de alguns dos fluidos de corte, além de diminuir os custos com a compra e reciclagem dos referidos fluidos.

O corte a seco apresenta várias vantagens, porém, para a sua aplicação, deve-se analisar cada variável do processo, como material e geometria da peça, material da ferramenta, tipo de processo e parâmetros de corte, pois esta técnica não é eficiente em todos os casos.

2.6 Trajetórias para fresamento de cavidades

Para efetuar uma operação de usinagem, além do cálculo dos parâmetros de corte, deve-se definir a trajetória da ferramenta (González, 2013). A obtenção de cavidades por fresamento pode ser realizada por diferentes estratégias de usinagem, que tem por base o tipo de entrada da ferramenta na peça e o seu percurso durante a remoção de cavaco (Andrade, 2012).

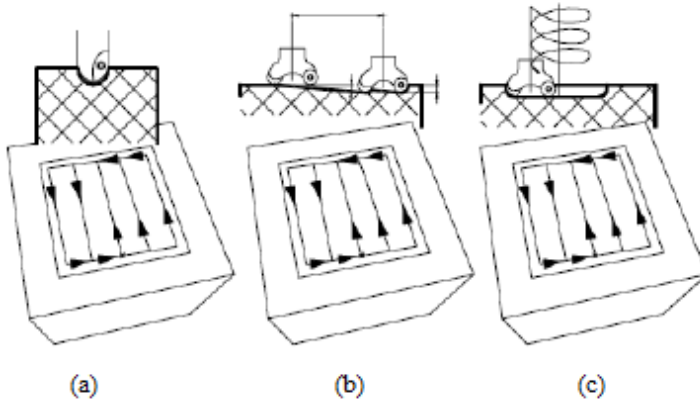
De acordo com Monreal e Rodriguez (2003), nas operações de fresamento a trajetória da ferramenta tem uma influência significativa no tempo de ciclo da operação e na qualidade da superfície usinada. Em

outras palavras, para a remoção da mesma quantidade de material, o tipo de movimentação da ferramenta produzirá resultados diferentes em termos de tempo de ciclo.

Para Ventura (2010), o tempo de corte, esforços envolvidos, acabamento da superfície usinada, desgaste de ferramenta e potência consumida pela máquina são alguns dos fatores levados em consideração na escolha da trajetória da ferramenta.

Como mencionado anteriormente, a entrada da ferramenta na peça é definida conforme a estratégia de usinagem adotada. De acordo com Andrade (2012) destacam-se três tipos de entrada, que são ilustradas na Figura 11.

Figura 11 - Tipos de entrada da ferramenta na peça: (a) em mergulho; (b) em rampa e (c) em hélice



Fonte: Andrade (2012)

Na entrada em mergulho o avanço da ferramenta é somente axial, como se a fresa realizasse um processo de furação e, assim como na furação, a saída do cavaco pode se tornar difícil em grandes profundidades, tornando necessário o uso de fluido de corte para auxiliar sua remoção.

Na entrada em rampa há uma combinação de avanço radial e axial, realizando-se uma interpolação linear entre a superfície a ser usinada com um ângulo mais suave. Este ângulo, chamado de ângulo de rampa, deve respeitar a inclinação máxima permitida pela ferramenta,

especificada em catálogo, para evitar choques entre a ferramenta e a peça ou quebra da ferramenta.

Na entrada em hélice a fresa realiza um movimento de interpolação helicoidal. Quando a ferramenta de corte possuir insertos, o diâmetro da cavidade deve ser especificado de acordo com o diâmetro da própria ferramenta, pois existe o risco de colisão da peça com o centro da ferramenta onde não há gume cortante.

Além do tipo de entrada da ferramenta na peça, define-se o percurso da ferramenta durante a remoção de cavaco de acordo com a estratégia de usinagem adotada.

Choy e Chan (2002) classificam as trajetórias percorridas pelas ferramentas de corte no fresamento de cavidades em dois grupos, linear e não-linear. De acordo com estes autores, entre as trajetórias lineares está a do tipo ziguezague, enquanto a trajetória paralela ao contorno é classificada como não-linear.

Nos últimos anos trajetórias trocoidais têm sido utilizadas como alternativas às trajetórias normalmente adotadas, especialmente no fresamento de materiais endurecidos. Otkur e Lazoglu (2006) apresentaram a mecânica do fresamento trocoidal pela primeira vez e, atualmente, existem diversas publicações que abordam o assunto.

Trajcetórias curvilíneas também têm sido amplamente pesquisadas e aplicadas no processo de fresamento de cavidades. Bieterman e Sandstrom (2003), por exemplo, apresentaram um método de geração de trajetórias curvilíneas para a usinagem de cavidades.

As trajetórias acima mencionadas serão individualmente definidas e melhor descritas nas próximas seções.

2.6.1 Trajetórias paralelas a uma direção

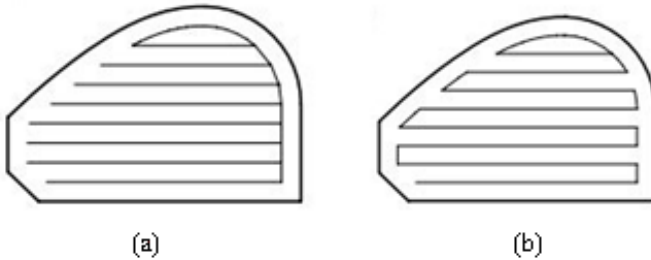
Quando uma ferramenta realiza este tipo de trajetória significa que ela seguirá um caminho em linhas paralelas a uma direção arbitrária. Na Figura 12 são ilustrados dois exemplos de trajetórias paralelas a uma direção.

Na Figura 12a é ilustrada uma trajetória paralela a uma direção em que o movimento de corte é realizado sempre no mesmo sentido (unidirecional). Para Choy e Chan (2002) a vantagem deste processo é a manutenção do método de remoção do cavaco durante quase todo o corte. Os mesmos autores citam como desvantagem a grande quantidade de movimentos passivos (isto é, em vazio) resultantes da constante necessidade de reposicionar a ferramenta para a posição inicial de corte.

A trajetória ilustrada na Figura 12b é denominada ziguezague. Nesta trajetória a ferramenta realiza um movimento de corte bidirecional, o que significa que o cavaco é removido nos dois sentidos em que a ferramenta se movimenta. O tempo com o reposicionamento da ferramenta, neste caso, é significativamente menor. Porém, Choy e Chan (2002) ressaltam que o método de remoção de cavaco é alternado entre concordante e discordante conforme o sentido da ferramenta se altera, o que pode causar maior desgaste da ferramenta.

González (2013) considera como vantagens deste tipo de trajetória o fato da profundidade radial de corte ser mantida constante em quase todo o processo, e sua programação ser relativamente fácil.

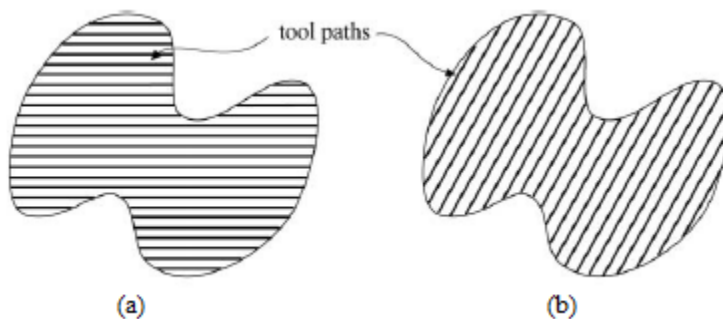
Figura 12 - Tipos de trajetórias paralelas a uma direção: (a) unidirecional e (b) ziguezague



Fonte: Adaptado de Chen e Fu (2011)

Kim e Choi (2000) mencionam que estudos foram realizados ao longo dos anos com o objetivo de melhorar a eficiência da usinagem com trajetórias paralelas a uma direção. Nesses estudos o foco foi determinar a direção de movimentação das ferramentas que resultasse no menor número de retrações. Os resultados obtidos mostram que a direção ótima é a direção que apresenta os trechos (linhas) mais longos e, desta forma, há maior remoção de material com menos reposicionamentos da ferramenta, conforme ilustrado da Figura 13.

Figura 13 - Direções das trajetórias paralelas a uma direção: (a) na direção horizontal, e (b) direção ótima

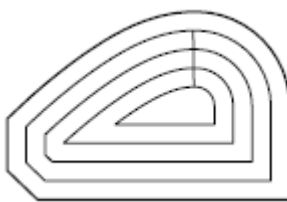


Fonte: Kim e Choi (2000)

2.6.2 Trajetórias paralelas ao contorno

As trajetórias paralelas ao contorno são obtidas pela realização sucessiva de *offsets* do contorno da cavidade (Lin et al., 2015), conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Exemplo de trajetória paralela ao contorno



Fonte: Adaptado de Chen e Fu (2011)

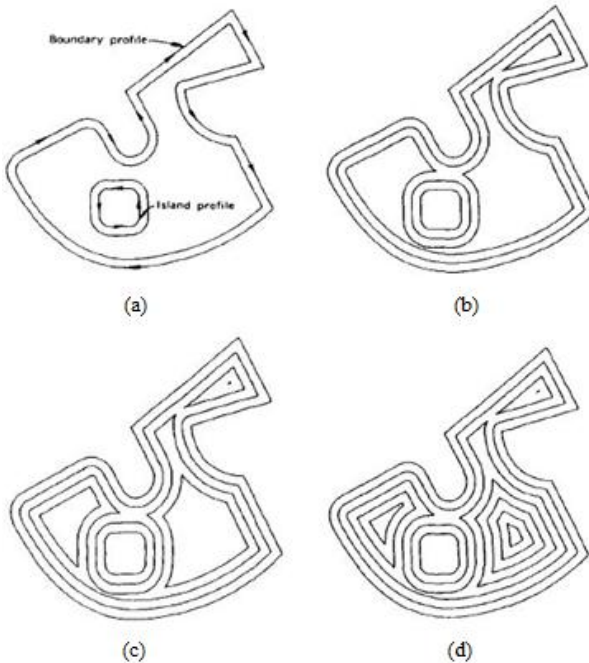
Choy e Chan (2002) ressaltam que neste tipo de trajetória a ferramenta fica em contato com o material da peça durante quase todo o processo, diminuindo o tempo de reposicionamento da ferramenta e, conseqüentemente, o tempo de ciclo. Além disto, o movimento da fresa é concordante ou discordante durante todo o tempo, não havendo alternâncias. Zhiwei et al. (2012) ainda estabelecem que quando as trajetórias paralelas ao contorno são utilizadas, a rugosidade da superfície usinada alcançada é melhor.

Uma desvantagem deste tipo de trajetória em relação às trajetórias paralelas a uma direção é a programação mais difícil. Este é um ponto apresentado por Lin et al. (2015). Gonzalez (2013) cita outra desvantagem, que é associada à mudança de direção com curvas pequenas na usinagem de materiais de alta dureza.

De acordo com Sheen e You (2015), no caso de cavidades com ilhas todo o material dentro da cavidade deve ser removido, com exceção do material das ilhas. A ilha possui o seu próprio contorno e, enquanto o *offset* do contorno da peça é feito de fora para dentro, o *offset* do contorno da ilha é feito de dentro para fora.

Uma ilustração do procedimento de geração de *offsets* para a usinagem de cavidades com ilhas é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Procedimento de geração de *offsets* para a usinagem de cavidades com ilhas



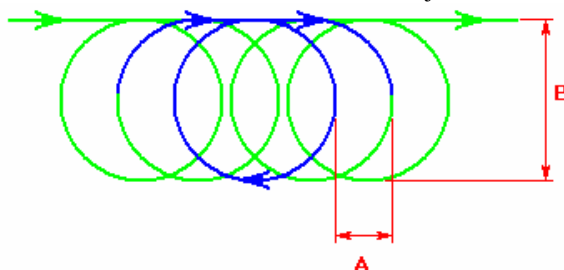
Fonte: Suh e Lee (1990)

2.6.3 Trajetórias trocoidais

A trajetória trocoidal é definida como a combinação de um movimento circular uniforme com um movimento linear uniforme (Rauch, Duc e Hascoet, 2009). Uma representação esquemática do movimento da ferramenta quando submetida a uma trajetória trocoidal é ilustrada na Figura 16, onde ‘A’ é o deslocamento da ferramenta entre as trajetórias circulares e ‘B’ é o diâmetro da trajetória circular que a ferramenta irá percorrer.

De acordo com Rauch, Duc e Hascoet (2009), o principal propósito das trajetórias trocoidais é manter o movimento de corte constante e evitar que a ferramenta seja completamente imersa no material. As condições de fresamento com estas trajetórias são favoráveis em termos de cargas na ferramenta.

Figura 16 - Movimento da ferramenta em uma trajetória trocoidal.



Fonte: Catia Doc (2015)

Além disto, González (2013) afirma que esta trajetória permite trocas suaves de direção da ferramenta, o que minimiza problemas decorrentes destas trocas de direção. Um exemplo destes problemas são as vibrações excessivas, que podem ocasionar maior desgaste da ferramenta e qualidade inferior da superfície usinada.

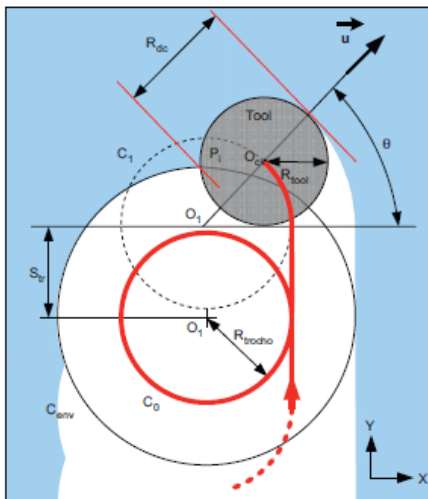
Apesar das vantagens deste tipo de trajetória em relação ao desgaste da ferramenta, o caminho percorrido pela ferramenta ao longo do processo tende a ser maior, assim como o tempo de usinagem (Ferreira e Ochoa, 2013). Por esse motivo, Ibaraki et al. (2010) propõem utilizar trajetórias trocoidais apenas para remover regiões críticas. Em grande parte dos casos, os cantos de uma cavidade são considerados como regiões críticas.

A programação destas trajetórias é muito mais complexa do que a programação das trajetórias citadas nas seções anteriores devido à maior

quantidade de parâmetros envolvidos no processo. Exemplos destes parâmetros podem ser observados na Figura 17.

Para Rauch, Duc e Hascoet (2009), as trajetórias trocoidais são uma boa alternativa em casos de desgaste de materiais de alta dureza.

Figura 17 - Parâmetros envolvidos na geração de trajetórias trocoidais



Fonte: Rauch, Duc e Hascoet (2009)

2.6.4 Trajetórias espiralares curvilíneas

A demanda de pesquisas na área de trajetórias de ferramentas tem aumentado com o aumento dos requisitos para estas trajetórias. Xiong, Zhuang e Ding (2010) citam estes requisitos como sendo trajetórias mais contínuas e com mudanças de direção menos bruscas.

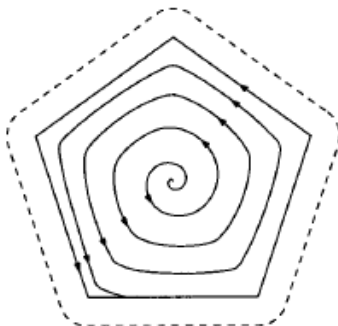
Nas trajetórias espiralares curvilíneas a ferramenta realiza um movimento circular em espiral que é iniciado no centro da cavidade e se estende até suas paredes. Além disso, na trajetória espiralar não há interseções.

Bieterman e Sanstrom (2003) mencionam que a trajetória espiralar possui uma curvatura reduzida e quase constante próximo ao centro da cavidade, e lentamente tem sua curvatura alterada de modo que, próxima às paredes da cavidade, ela assuma o formato da mesma, conforme ilustrado na Figura 18.

Enquanto a ferramenta realiza uma trajetória espiralar ela não sofre imersão completa no material, e o movimento de corte é sempre o

mesmo, assim como na trajetória trocoidal, porém há remoção de cavaço durante praticamente toda a trajetória, o que não acontece na trocoidal.

Figura 18 - Exemplo de trajetória espiralar



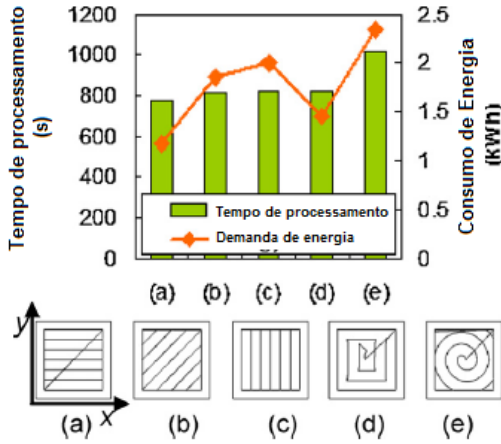
Fonte: Bieterman e Sanstrom (2003)

No estudo realizado pelos referidos autores as trajetórias espiralares apresentaram redução no tempo de usinagem quando comparadas às trajetórias paralelas ao contorno e ziguezague, porém o comprimento da trajetória foi o maior. Outro benefício observado foi a redução do desgaste de ferramenta no corte de metais com alta dureza.

Apesar dos benefícios citados, um estudo realizado por Kong et al. (2011), comparou o tempo de processamento e o consumo de energia entre trajetórias paralelas a uma direção, apresentadas na Figura 19a, 19b e 19c, e trajetórias espiralares, apresentadas na Figura 19d e 19e. Os autores observaram que tanto o maior consumo de energia quanto o maior tempo de processamento foram apresentados pela trajetória espiralar curvilínea, conforme representado no gráfico da Figura 19.

Com base nos dados apresentados, neste trabalho a trajetória espiralar curvilínea não será abordada. Serão comparados os consumos de energia apresentados pelas trajetórias ziguezague, paralela ao contorno e pela combinação das trajetórias trocoidal e paralela ao contorno. Além disso, será analisado o desgaste da ferramenta utilizada no desbaste para cada uma das trajetórias.

Figura 19 - Tempo de processamento e consumo de energia de trajetórias paralelas a uma direção e espiralares



Fonte: Kong et al. (2011)

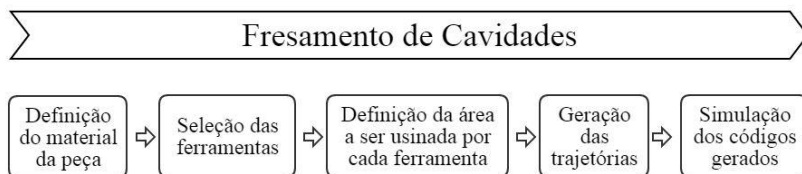
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas a metodologia e as estratégias de fresamento adotadas, os materiais e equipamentos utilizados na realização do trabalho, e o planejamento e execução experimental.

3.1 Metodologia

Para a realização deste trabalho foram estabelecidas cinco etapas a fim de auxiliar a tomada de decisões e obter os melhores resultados. Estas etapas são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Etapas estabelecidas para a realização deste trabalho



Fonte: Elaboração própria

O primeiro passo é a especificação do material da peça, por afetar diretamente decisões posteriores. A escolha das ferramentas é a etapa seguinte, que depende do material da peça, da geometria desejada da peça, e da operação a ser realizada. A área que cada ferramenta irá usar é definida após a seleção das mesmas. Posteriormente são geradas as diferentes trajetórias para cada uma das ferramentas selecionadas. O último passo é a geração dos programas em código G, que contêm as trajetórias geradas e serão inseridos no comando numérico da máquina-ferramenta para a realização da usinagem. Antes destes códigos serem enviados para a máquina-ferramenta eles devem ser simulados para que não ocorram erros durante a usinagem.

O modo como cada uma destas etapas foi realizada no decorrer deste trabalho serão descritas nas próximas seções.

3.1.1 Material ensaiado

O material utilizado nos ensaios foi o aço AISI P20. O referido material foi selecionado por ser um aço com ampla aplicação industrial, e pela disponibilidade do mesmo no laboratório para que a execução dos

ensaios fosse realizada. De acordo com Zeilmann et al. (2012), suas principais aplicações são matrizes e moldes.

Os ensaios foram realizados em blocos com dimensões 300x200x50mm. Um exemplar destes blocos preparado para a usinagem pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Bloco de aço AISI P20 preparado para a usinagem



Fonte: Elaboração própria

Os blocos utilizados provêm do mesmo fabricante e lote do material utilizado e caracterizado por Guarnizo (2012). Suas principais características são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do material ensaiado

Composição química	
Carbono	0,417%
Silício	0,252%
Manganês	1,44%
Cromo	1,93%
Molibdênio	0,240%
Propriedade	
Dureza média	31 HRC

Fonte: Elaboração própria segundo Guarnizo (2012)

3.1.2 Ferramentas de corte

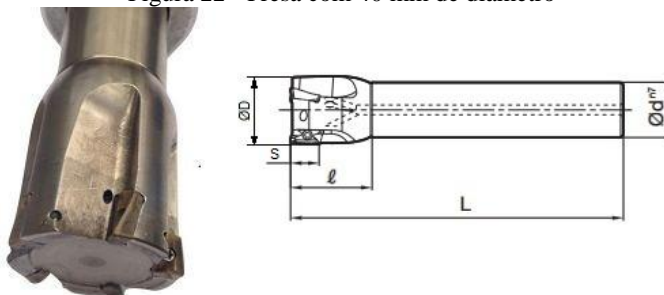
No fresamento de cavidades é comum que mais de uma ferramenta seja utilizada devido à complexidade das geometrias requeridas, além da necessidade de garantir que a peça cumpra os requisitos de projeto.

Na operação de desbaste, analisada neste estudo, foram selecionadas ferramentas com diâmetros de 20 e de 40 mm, pois estas proporcionam uma alta taxa de remoção de material combinada com uma maior rigidez.

- Fresa com 40 mm de diâmetro

O suporte com 40 mm de diâmetro é fabricado em aço pela empresa Kyocera e permite a fixação de 5 insertos com furo por meio de parafusos, como pode ser observado na Figura 22. As dimensões e algumas características deste suporte são apresentadas na Tabela 5. Esta fresa permite a alimentação de fluido através da haste (não disponível na fresadora empregada).

Figura 22 - Fresa com 40 mm de diâmetro



Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 – Características e dimensões do suporte com 40mm de diâmetro

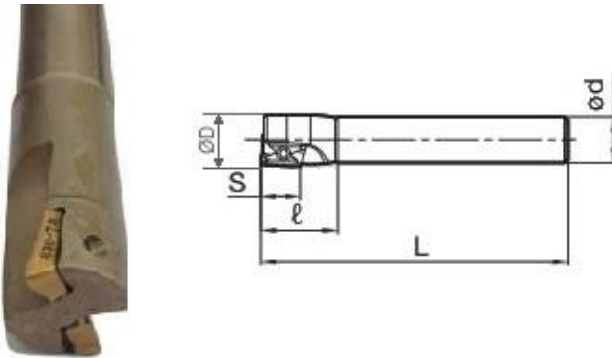
Características	
Especificação	MEC 40-S32-11T
Número de insertos	5
Dimensões	
ØD	40 mm
L	150 mm
Ød	32 mm
l	50 mm
S	10 mm

Fonte: Elaboração própria

- Fresa com 20 mm de diâmetro

O suporte com 20 mm de diâmetro é fabricado pela empresa Casa do Torneiro, situada em Joinville. Nele são fixados 2 insertos da mesma maneira que o suporte anterior. O suporte utilizado é apresentado na Figura 23, e suas dimensões e algumas características são apresentadas na Tabela 6.

Figura 23 - Fresa com 20 mm de diâmetro



Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 - Dimensões do suporte com 20 mm de diâmetro

Características	
Especificação	CT.20.2.H19.L150
Número de insertos	2
Dimensões	
ØD	20 mm
L	150 mm
Ød	19 mm
l	30 mm
S	10 mm

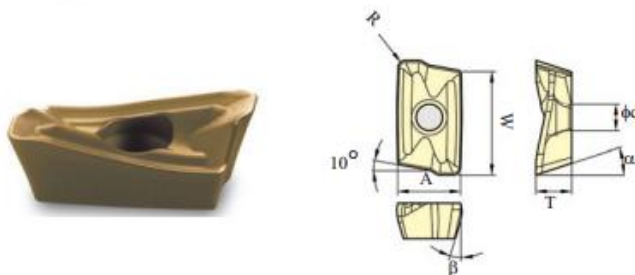
Fonte: Elaboração própria

Os dois suportes empregados permitem a fixação do mesmo inserto de metal-duro. Foi selecionado um inserto de metal duro revestido para a execução de todos os ensaios. As características e propriedades dos insertos, fabricados pela empresa Kyocera, serão apresentadas a seguir.

- Insertos de metal-duro

A geometria das dimensões principais dos insertos empregados é apresentada de forma esquemática e parametrizada na Figura 24. Na Tabela 7 são apresentadas as características e dimensões específicas da pastilha empregada.

Figura 24 - Inseto de metal-duro utilizado nos ensaios



Fonte: Kyocera (2011)

Tabela 7 - Características e dimensões do inseto de metal-duro

Características	
Especificação	BDMT 11T308ER-JT
Classificação ISO	P20
Revestimento	TiAlN + TiN
Dureza do material base	14,2 GPa
Dimensões	
A	6,7 mm
T	3,8 mm
Ød	2,8 mm
W	11 mm
R	0,8 mm
α	18°
β	13°

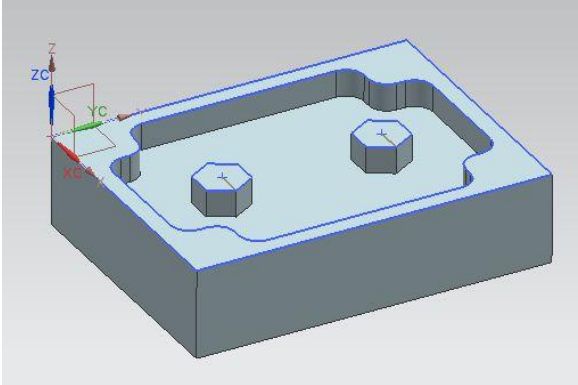
Fonte: Elaboração própria segundo Kyocera (2011)

3.1.3 Área a ser usinada por cada ferramenta

Para que o tempo de usinagem no desbaste seja o menor possível é necessário que o volume de material removido seja maximizado. Garantir que isso aconteça pode reduzir o número de ferramentas utilizadas, os tempos de troca de ferramenta e, conseqüentemente, o tempo total do processo.

A cavidade adotada para a presente pesquisa possui duas ilhas hexagonais conforme ilustrado na Figura 25. Todas as suas dimensões são apresentadas na Figura A.2, no Apêndice A. Estas dimensões foram estabelecidas para possibilitar a utilização das ferramentas disponíveis para uso, descritas anteriormente. Além disto, a cavidade complexa sugerida possui cantos que favorecem a comparação de desempenho entre as trajetórias geradas.

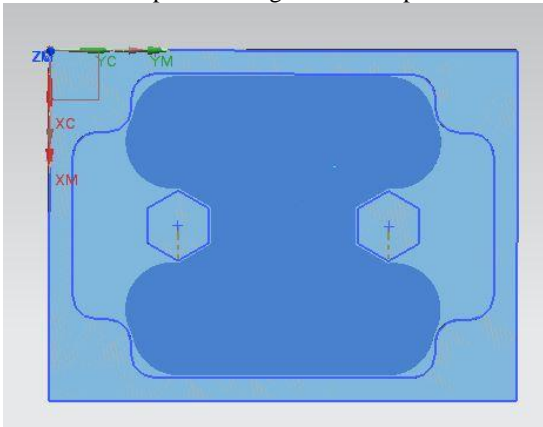
Figura 25 – Vista isométrica da cavidade usinada nos ensaios



Fonte: Elaboração própria

A maior área que a fresa de 40 mm pode remover é a região escura na Figura 26.

Figura 26 – Vista superior da região usinada pela fresa de 40 mm

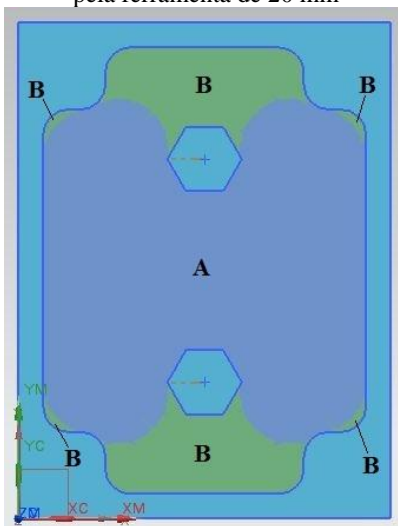


Fonte: Elaboração própria

Esta área foi estabelecida gerando-se uma trajetória paralela ao contorno da cavidade. A trajetória teve início no ponto médio do eixo y e seguiu o contorno da cavidade até as regiões onde sua penetração foi limitada por questões dimensionais. Pode-se observar que o deslocamento da ferramenta foi impedido pelas ilhas nas regiões que apresentaram a maior quantidade de material restante, já nos cantos o alcance da ferramenta foi limitado pelo raio de concordância menor do que o raio da ferramenta. Ao se deparar com estas limitações de movimento, a ferramenta adotou o contorno das ilhas para continuar a remoção de material da peça.

O material restante da cavidade é removido pela ferramenta com diâmetro de 20 mm, que não tem limitações de deslocamento com as dimensões da cavidade. Na Figura 27 são apresentadas as regiões removidas por cada ferramenta, sendo a região 'A' removida pela ferramenta de 40 mm, enquanto as regiões 'B' são removidas pela ferramenta de 20 mm.

Figura 27 – Região 'A' usinada pela ferramenta de 40 mm, e região 'B' usinada pela ferramenta de 20 mm



Fonte: Elaboração própria

Para fins de comparação, a mesma área deve ser removida por cada ferramenta em cada trajetória gerada. Este fator é salientado porque as limitações de movimentos da ferramenta de 40 mm podem variar de acordo com a trajetória que a ferramenta está programada para executar.

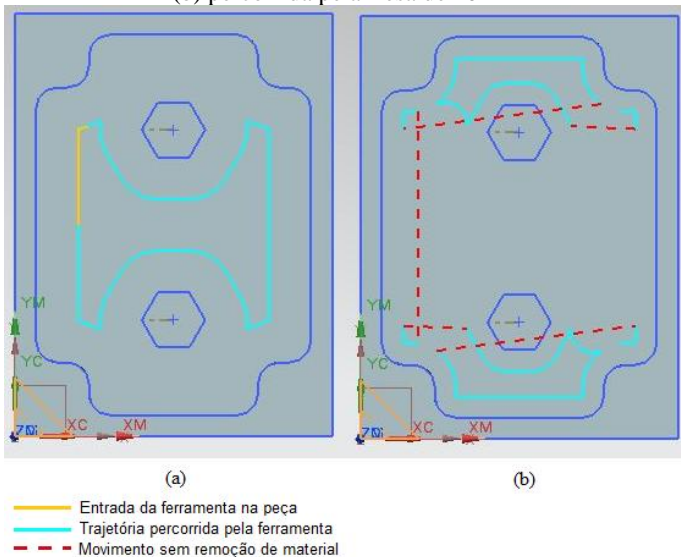
3.1.4 Geração das trajetórias

Para a usinagem da cavidade proposta foram geradas três estratégias distintas para cada ferramenta, sendo elas paralela ao contorno, ziguezague e trocoidal seguindo o contorno da cavidade. A geração das trajetórias foi feita usando-se o *software* UGS NX. As principais etapas deste processo são apresentadas no Apêndice B. As estratégias adotadas serão descritas a seguir.

- Trajetória paralela ao contorno

A trajetória paralela ao contorno percorrida pela ferramenta de 40 mm foi descrita de maneira sucinta anteriormente. Uma ilustração desta trajetória pode ser observada na Figura 28a, onde a trajetória é representada pela linha azul.

Figura 28 - Trajetória paralela ao contorno: (a) percorrida pela fresa de 40 mm e (b) percorrida pela fresa de 20 mm



Fonte: Elaboração própria

A entrada da ferramenta na peça foi em rampa, já acompanhando o contorno da cavidade, e teve início no ponto médio do eixo y, como

citado anteriormente. Este movimento é representado pela linha amarela da ilustração.

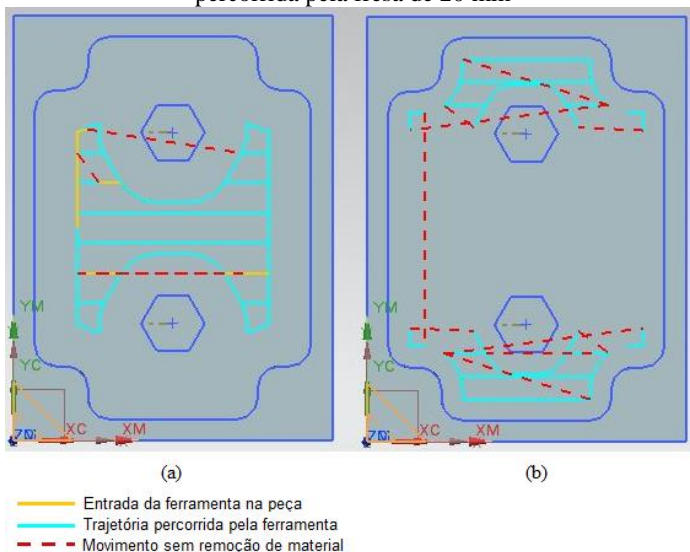
A trajetória paralela ao contorno percorrida pela ferramenta de 20 mm é apresentada na Figura 28b, pela linha azul. A entrada da ferramenta em cada região usinada foi em mergulho e não foi feita diretamente na peça, e sim em partes onde o material já havia sido removido pela ferramenta anterior. O corte teve início no canto inferior direito da cavidade e percorreu em sentido horário as áreas onde ainda havia material a ser removido. As linhas vermelhas tracejadas representam os movimentos da ferramenta onde não há remoção de cavaco.

Os caminhos percorridos pelas ferramentas nesta trajetória são relativamente curtos e são feitos poucos reposicionamentos das ferramentas. Entretanto, as ferramentas permanecem em contato com o material durante todo o movimento de corte.

- Trajetória Ziguezague

Ilustrada na Figura 29a, a trajetória ziguezague gerada para a ferramenta de 40 mm também entrou na peça em rampa e seguiu seu deslocamento paralelamente ao eixo x .

Figura 29 - Trajetória ziguezague: (a) percorrida pela fresa de 40 mm e (b) percorrida pela fresa de 20 mm



Fonte: Elaboração própria

A ferramenta teve que efetuar duas novas entradas em rampa na peça após o início da usinagem, para que o sentido do movimento fosse mantido.

O caminho paralelo ao contorno apresentado foi gerado para garantir que a área mínima a ser usinada pela ferramenta fosse respeitada.

Para a ferramenta de 20 mm a entrada na peça é feita em mergulho, tendo início no canto inferior direito. Em seguida as demais regiões são usinadas, conforme a Figura 29b.

Assim como para a maior ferramenta, foram gerados elementos paralelos ao contorno da cavidade para garantir que todo o material fosse removido.

Nas imagens pode-se observar que são realizados mais movimentos sem remoção de material, representados pelas linhas vermelhas tracejadas, na trajetória ziguezague em comparação à trajetória paralela ao contorno. Isso acontece porque a ferramenta deve manter o sentido do seu movimento conforme o estabelecido, neste caso paralelo ao eixo 'x', e a ferramenta deve ser deslocada para todas as regiões onde o corte neste sentido é possível.

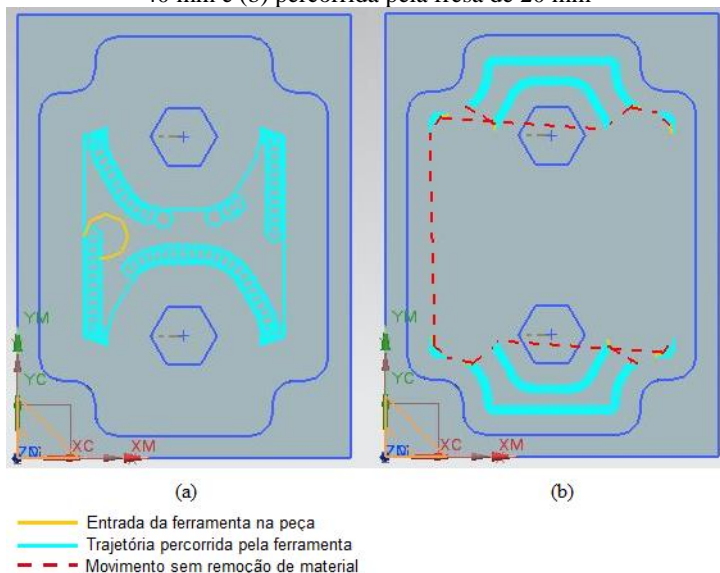
- Trajetória trocoidal e paralela ao contorno

A trajetória trocoidal efetuada pela ferramenta de 40 mm teve início no ponto médio do eixo y da cavidade, assim como as trajetórias anteriores. Porém, neste caso a entrada da ferramenta na peça é em hélice com um raio de 20 mm, conforme a Figura 30a. A entrada em hélice foi selecionada com o intuito de remover um maior volume de material na entrada da ferramenta na peça. Após a entrada a ferramenta segue realizando movimentos circulares acompanhando o contorno da cavidade.

Para que fosse possível remover toda a área previamente estabelecida para a ferramenta de 40 mm, os raios das trocoides não foram mantidos constantes durante o corte, obtendo-se raios muito pequenos nas regiões onde o alcance da ferramenta torna-se limitado. Nas regiões de livre movimentação da ferramenta, o diâmetro das trocoides é mantido constante e igual a 8 mm por ser uma dimensão com a qual a ferramenta consegue seguir uma trajetória paralela ao contorno da cavidade combinada com movimentos trocoidais.

As regiões da trajetória que não possuem movimentos trocoidais são onde estes movimentos não são necessários pois o excesso de material já havia sido removido durante algum movimento anterior e a ferramenta não ficaria totalmente imersa no material.

Figura 30 - Trajetória trocoidal paralela ao contorno: (a) percorrida pela fresa de 40 mm e (b) percorrida pela fresa de 20 mm



Fonte: Elaboração própria

A trajetória trocoidal percorrida pela ferramenta de 20 mm é semelhante à trajetória paralela ao contorno para a mesma ferramenta. Nesta trajetória, apresentada na Figura 30b, a ferramenta percorre segmentos paralelos ao contorno da cavidade sempre realizando movimentos circulares.

A entrada da ferramenta é feita em mergulho em regiões nas quais já havia sido feita remoção de material pela ferramenta anterior, e a trajetória teve início no canto inferior direito da cavidade, como nas demais trajetórias.

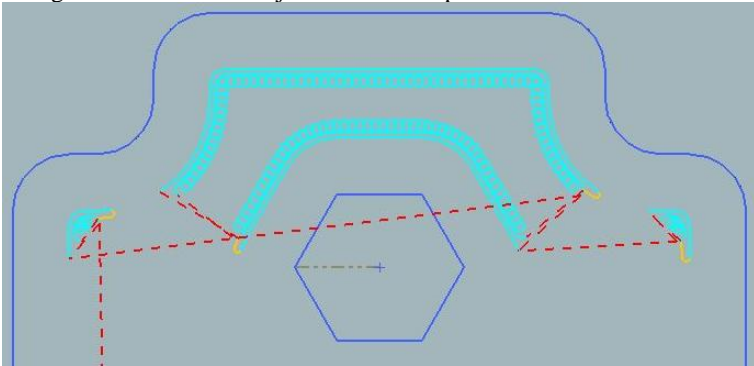
O diâmetro das trocoides, neste caso, é muito pequeno para permitir que o material dos cantos seja removido com movimentos circulares. Porém, ao contrário da ferramenta maior, este diâmetro é mantido constante em 2,8 mm para todo o movimento de corte.

Na Figura 31 é apresentada uma ampliação da trajetória na região superior da cavidade para melhor visualização das suas dimensões.

O caminho percorrido pelas ferramentas ao realizarem uma trajetória trocoidal é significativamente maior do que nos dois casos apresentados anteriormente. Contudo, nestas trajetórias não há imersão completa da ferramenta no material, como pode acontecer nas trajetórias

paralela ao contorno e ziguezague, e nem há mudança na direção do corte, como na trajetória ziguezague. Com isso espera-se obter menores desgastes de ferramenta.

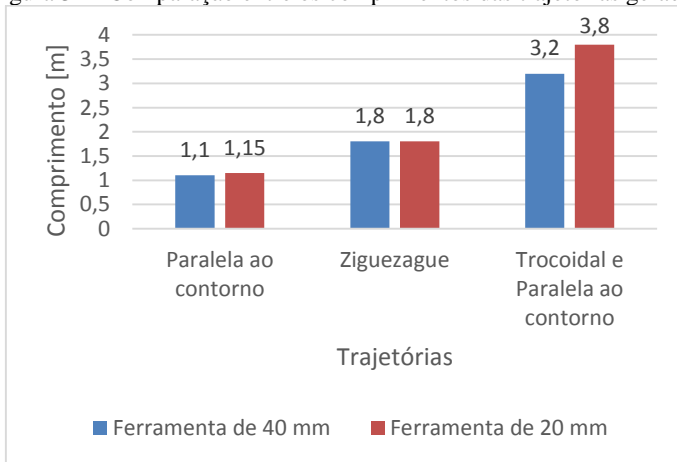
Figura 31 – Zoom da trajetória trocoidal para a ferramenta de 20 mm



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 32 é apresentada uma comparação do comprimento do caminho percorrido pelas ferramentas em cada trajetória, incluindo movimentos de aproximação e afastamento da peça e os deslocamentos sem remoção de material.

Figura 32 - Comparação entre os comprimentos das trajetórias geradas



Fonte: Elaboração própria

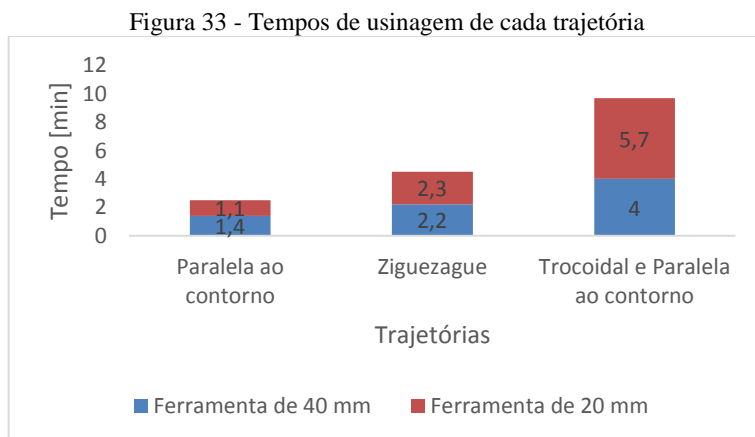
Como mencionado, as trajetórias trocoidais geram caminhos significativamente maiores para as ferramentas percorrem quando comparadas às trajetórias paralela ao contorno e ziguezague, no caso das trajetórias apresentadas cerca de 1,8 a 3 vezes para a ferramenta de 40 mm e de 2 a 3,3 vezes para a ferramenta de 20 mm. O comprimento das trajetórias foi bastante semelhante para ambas as ferramentas nas trajetórias paralela ao contorno e ziguezague pois, apesar da área a ser usinada ser consideravelmente menor, a ferramenta de 20 mm deve ser reposicionada várias vezes.

3.1.5 Simulação das trajetórias

O passo seguinte à geração das trajetórias consiste em gerar os programas em código G, os quais serão inseridos na máquina para a realização dos ensaios. Estes códigos são gerados selecionando-se um pós-processador entre os inseridos no *software* UGS-NX. Algumas modificações no código gerado pelo *software* foram necessárias para possibilitar a sua leitura pela máquina-ferramenta disponível.

Posteriormente os códigos gerados foram simulados no *software* Sinutrain, que é o *software* utilizado no suporte à programação do CNC Siemens Sinumerik 840Di. O intuito destas simulações é garantir que não haja erros de programação nos códigos que possam causar choques entre ferramenta, peça ou elementos da máquina.

Além disto, os tempos de usinagem para cada ferramenta, em cada trajetória, foram obtidos a partir das simulações realizadas. Estes tempos são apresentados na Figura 33.



Fonte: Elaboração própria

A trajetória paralela ao contorno foi a que apresentou o menor tempo total de usinagem, 2,6 minutos, sendo a parcela de tempo da ferramenta de 40 mm superior à de 20 mm, 1,4 e 1,2 minutos respectivamente, isto se deve à área total usinada por cada ferramenta.

A trajetória zigzague apresentou um tempo total de usinagem 80% superior à trajetória paralela ao contorno, 4,5 minutos. Neste caso o tempo de usinagem da ferramenta de 20 mm foi maior mesmo a área usinada por ela sendo menor, 2,3 minutos em relação a 2,2 minutos da ferramenta de 40 mm. Isto se deve ao maior número de reposicionamentos da ferramenta que foram necessários.

O tempo total de usinagem para a trajetória paralela ao contorno e trocoidal foi significativamente superior ao tempo total das duas outras trajetórias, 9,7 minutos. A parcela de tempo de usinagem correspondente à ferramenta de 20 mm também foi maior em relação à ferramenta de 40 mm para esta trajetória, 5,7 e 4 minutos respectivamente, porém neste caso a justificativa não é o reposicionamento da ferramenta e, sim, o tamanho do diâmetro da trocoide.

Uma análise dos tempos de usinagem pode contribuir com informação sobre o consumo de energia do processo. Porém, a trajetória com os maiores tempos de usinagem não consumirá, necessariamente, mais energia.

3.2 Equipamentos

A seguir são apresentados os equipamentos utilizados na execução dos ensaios.

3.2.1 Máquina-ferramenta

Os ensaios foram realizados em uma fresadora Charles M_{VC}-955 com comando numérico Siemens Sinumerik 840Di. Suas principais características são especificadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Características da fresadora Charles MVC-955

Característica	Especificação
MESA	
Capacidade de carga da mesa	600 kg
Dimensões da mesa	1000x510 mm
CURSO	
Curso da mesa [X,Y]	900x550 mm
Curso do cabeçote [Z]	530 mm

CABEÇOTE – EIXO ÁRVORE	
Potência do motor principal	7,5 kW
Rotação máxima do eixo-árvore	8000 RPM
Sistema de fixação da ferramenta	Pneumático
Cone	BT-40
AVANÇO RÁPIDO	
Avanço rápido nos eixos X e Y	20 m/min
Avanço rápido no eixo Z	15 m/min
MAGAZINE – TROCADOR DE FERRAMENTA	
Capacidade de ferramentas do magazine	16 unidades
Tempo de troca de ferramentas	10 seg

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do equipamento

3.2.2 Fluido de corte

No caso do fresamento de um material de elevada dureza, os fabricantes de ferramentas sugerem que o corte seja realizado a seco, pois as altas temperaturas alcançadas no processo podem acabar facilitando a remoção do material, conforme mencionado na seção 2.5 do presente trabalho.

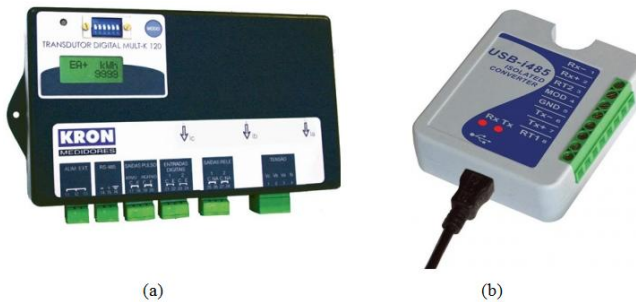
Com o objetivo de tornar o processo realizado mais sustentável, levando-se em consideração as cargas ambientais que o uso de fluido de corte apresentam e que foram discutidas anteriormente, foi utilizado apenas ar comprimido como fluido de corte, apesar do alto consumo de energia que os dispositivos para a utilização deste fluido apresentam. O ar comprimido não possui características refrigerantes, por isso sua função foi unicamente remover o cavaco da zona de corte.

O ar comprimido foi aplicado pelo dispositivo apresentado na Figura 24 a uma pressão de 7,5 bar.

3.2.3 Medição do consumo de energia

A medição do consumo de energia nos ensaios foi feita utilizando-se um transdutor digital de grandezas elétricas, modelo Mult-K 120, e um conversor KR-485/USB, ambos da marca KRON e apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Equipamento para medição de energia: (a) transdutor de grandezas elétricas e (b) conversor KR-485/USB



Fonte: Kron (2015)

A função do conversor é apenas a interligação entre o transdutor e o computador, que se faz necessária unicamente pela mudança no padrão de interface. Ele possui LEDs indicadores de transmissão e recepção de dados, além de isolamento de uma diferença de potencial de 1500 Vcc entre as portas USB e RS-485 que protegem o computador de picos, surtos e erros de ligação. Outras das principais características do equipamento são apresentadas na Tabela 10.

RS-485 é a denominação de uma norma que define esquemas de transmissão de dados em ambientes ruidosos. Esta norma é adotada como especificação da camada física de vários protocolos para a comunicação de dados, mas não define quais protocolos devem ser usados. Neste trabalho o protocolo de comunicação de dados utilizado foi o Modbus.

Tabela 9 - Características do conversor KR-485/USB

Características	Valor
Resistores de terminação internos habilitados por jumper	120Ω
Taxa de comunicação	300 bps a 250kbps
Comprimento máximo dos cabos RS-485	1200m
Conexão RS-485	Fios de até 1,5mm ²
Ambiente de operação	0 a 50°C

Fonte: Elaboração própria

O transdutor utilizado permite medidas diretas de até 44 parâmetros elétricos em sistema de corrente alternada (CA). Seu princípio de funcionamento consiste em calcular os parâmetros elétricos a partir dos

sinais de tensão e corrente obtidos do sistema medido. Dentre os parâmetros obtidos tem-se:

- Tensão (fase-fase, fase-neutro, trifásica);
- Frequência;
- Corrente (por fase e trifásica);
- Potência ativa (por fase e trifásica);
- Potência reativa (por fase e trifásica);
- Potência aparente (por fase e trifásica);
- Fator de potência (por fase e trifásico);
- Demanda ativa (média e máxima);
- Demanda aparente (média e máxima);
- Energia ativa (positiva e negativa);
- Energia reativa (positiva e negativa);
- Máximos (tensão e corrente)

As características do equipamento são apresentadas na Tabela 9.

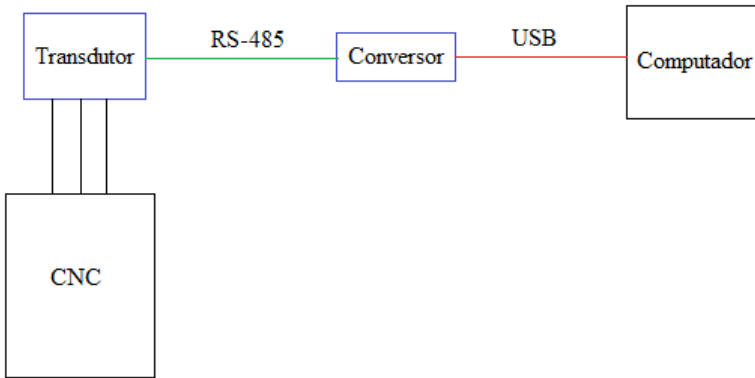
Tabela 10 - Características do transdutor Mult-K 120

Característica	Valor
Precisão	
Tensão, corrente e potências	0,2%
Energia	0,5%
Faixas de operação	
Tensão	20 a 500Vc.a.
Frequência	44 a 72Hz
Corrente	1,5Ac.a. a 120Ac.a.
Temperatura	0 a 60°C

Fonte: Elaboração própria

Uma representação esquemática com todos os componentes envolvidos no processo de medição de energia durante os ensaios realizados é apresentada na Figura 35. Nela é possível observar como foram feitas as conexões de cada componente. O CNC foi conectado ao transdutor, que por sua vez foi conectado ao conversor por meio das portas RS-485 e, finalmente, o conversor foi conectado ao computador mediante a porta USB.

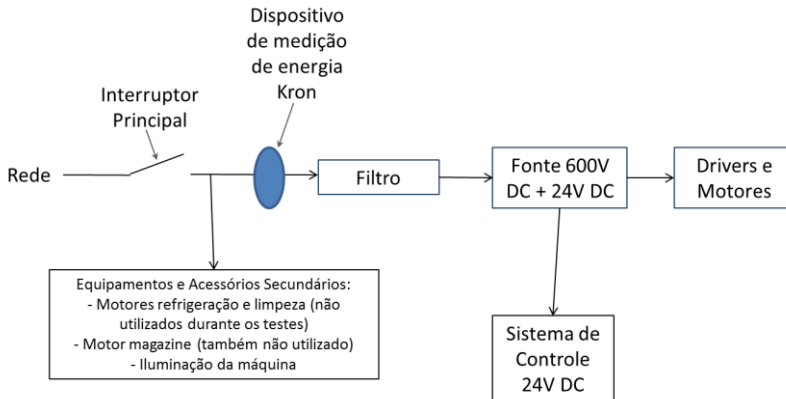
Figura 35 - Esquema do sistema de medição de energia



Fonte: Elaboração própria

O transdutor foi conectado logo após a alimentação de equipamentos e acessórios secundários da fresadora, como apresentado na Figura 36. Desta forma, foram obtidos dados de consumo de energia que não incluem o consumo destes componentes, porém que englobam os demais dispositivos da fresadora, como filtro, sistema de controle, drivers e motores.

Figura 36 – Escopo da conexão entre a máquina-ferramenta e o dispositivo de medição de energia



Fonte: Elaboração própria

A aquisição dos dados no computador foi feita utilizando-se o *software* RedeMB5 fornecido gratuitamente pela KRON.

3.3 Tratamento de dados

Os dados colhidos sobre o consumo de energia e o desgaste dos insertos foram analisados estatisticamente utilizando os conceitos apresentados por Montgomery e Runger (2012). Os resultados obtidos foram apresentados graficamente utilizando-se o *software Microsoft Office Excel 2013*, assim como os dados de comprimento das trajetórias e tempos de usinagem.

Os dados de consumo de energia e tempo de usinagem foram colhidos a partir do movimento de aproximação da ferramenta em relação à peça até o seu afastamento ao final do corte, considerando-se avanços rápidos e possíveis reposicionamentos. Não foram considerados dados de trocas de ferramenta.

3.4 Planejamento e execução experimental

O plano estabelecido para a realização do experimento foi idealizado com o intuito de avaliar o consumo de energia de cada trajetória. Neste plano foi estabelecido que cada trajetória seria usinada 10 vezes para garantir a confiabilidade dos dados obtidos.

A mesma sequência de ferramentas foi utilizada em todas as trajetórias, sendo realizado o desbaste com o suporte de 40 mm primeiro, e posteriormente o desbaste com o suporte de 20 mm.

Na Figura 37 é apresentada a sequência completa das etapas adotadas para a realização dos ensaios. Os blocos de aço AISI P20 são fixados na máquina, e depois é feita a fixação da ferramenta de 40 mm de diâmetro. A geração do código G e suas simulações foram feitas durante a etapa da geração das trajetórias, estando os códigos devidamente preparados no momento dos ensaios. A peça ensaiada é usinada 10 vezes com a ferramenta de 40 mm percorrendo a primeira trajetória gerada, conforme estabelecido, seguida das demais trajetórias com a mesma ferramenta, porém diferentes insertos.

Após os ensaios com a ferramenta maior é feita a troca de ferramenta manualmente por questões técnicas da fresadora utilizada. Estando fixa, a ferramenta de 20 mm realiza a usinagem da peça para cada uma das trajetórias, trocando-se os insertos entre os ensaios.

Figura 37 - Sequência de etapas adotada para realizar os ensaios



Fonte: Elaboração própria

O mesmo procedimento é realizado em vazio para a obtenção dos dados de consumo de energia somente durante os movimentos de corte. A ferramenta de 40 mm de diâmetro percorre 10 vezes a primeira trajetória gerada sem material a ser removido, seguida das demais trajetórias para a mesma ferramenta. Neste caso, não há a necessidade de fixar ou trocar os insertos no suporte pois não foi inserido nenhum bloco no interior da fresadora.

Após os ensaios em vazio com a ferramenta maior é feita a troca de ferramenta. O suporte com 20 mm de diâmetro percorre cada uma das trajetórias sem realizar a remoção de material e, assim como mencionado anteriormente, não é feita a fixação ou troca de insertos. Ao fim dos ensaios, os dados de consumo de energia obtidos pelo transdutor estão prontos para análise.

3.4.1 Parâmetros de corte utilizados nos ensaios

Os parâmetros de corte utilizados com a ferramenta de 40 mm foram mantidos constantes para todas as trajetórias, assim como os da ferramenta de 20 mm. A manutenção destes parâmetros permitiu que a influência das trajetórias no consumo de energia pudesse ser analisada isoladamente.

Os parâmetros de cada suporte são apresentados a seguir.

- Parâmetros de corte da fresa de 40 mm

A fresa de 40 mm foi utilizada para usinar a região 'A' da Figura 30 em uma operação de desbaste. Os parâmetros desta etapa do processo são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros de corte utilizados para o suporte Kyocera com 40 mm de diâmetro

Suporte Kyocera com diâmetro 40 mm		
Velocidade de corte	120 m/min	
Avanço por dente	0,15 mm/dente	
Velocidade angular do fuso	955 min ⁻¹	
Velocidade de avanço	x,y	716 mm/min
	Hel.	286 mm/min
	z	72 mm/min
Ângulo máximo de rampa	0,8°	
Profundidade de corte	0,5 mm	

Fonte: Elaboração própria

- Parâmetros de corte da fresa de 20 mm

O suporte com 20 mm de diâmetro foi utilizado no processo de desbaste da região 'B' da Figura 30. Os parâmetros adotados nesta etapa são apresentados na Tabela 12.

Os parâmetros selecionados nos dois casos estão dentro das recomendações do fabricante dos insertos, a Kyocera. Como os dois processos são de desbaste, e optou-se por não variar os parâmetros de corte, o valor da velocidade de corte selecionado foi próximo à velocidade máxima indicada pelo fabricante, de 150 m/min. Valores maiores não foram selecionados devido à quantidade limitada de materiais disponíveis para o ensaio.

Tabela 12 - Parâmetros de corte utilizados para o suporte Casa do Torneiro com 20 mm de diâmetro

Suporte Casa do Torneiro com diâmetro 20 mm		
Velocidade de corte	120 m/min	
Avanço por dente	0,15 mm/dente	
Velocidade angular de fuso	1910 rpm	
Velocidade de avanço	x,y	573 mm/min
	z	57 mm/min
Profundidade de corte	0,5 mm	

Fonte: Elaboração própria

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de fresamento. Primeiramente, são apresentadas os resultados e a análise dos consumos de energia obtidos nos ensaios realizados, seguidos pelas análises de sustentabilidade do processo. Finalmente, são apresentadas as geometrias obtidas ao final dos ensaios.

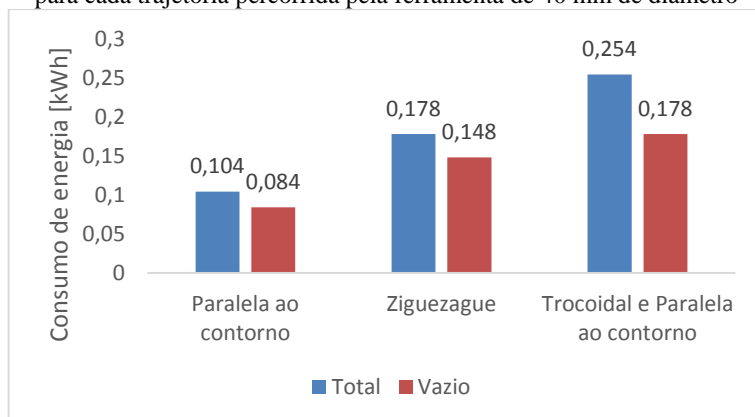
4.1 Consumo de energia

A aquisição dos dados de consumo de energia foi realizada a partir do início da usinagem, com um transdutor de grandezas elétricas. Foram obtidos dados de energia ativa, que é a energia elétrica efetivamente consumida pela fresadora em quilowatt-hora (kWh), e de potência requerida do motor durante o funcionamento da máquina em watt (W).

4.1.1 Desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro

Primeiramente, foram realizadas as medições da energia total consumida pela fresadora durante a realização do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro, sendo realizados 10 ensaios para cada trajetória. Posteriormente, os ensaios foram repetidos em vazio para que fossem obtidos os consumos de energia de cada trajetória apenas durante o corte. Os valores médios obtidos são apresentados na Figura 38.

Figura 38 – Comparação entre os consumos de energia ativa total e em vazio para cada trajetória percorrida pela ferramenta de 40 mm de diâmetro

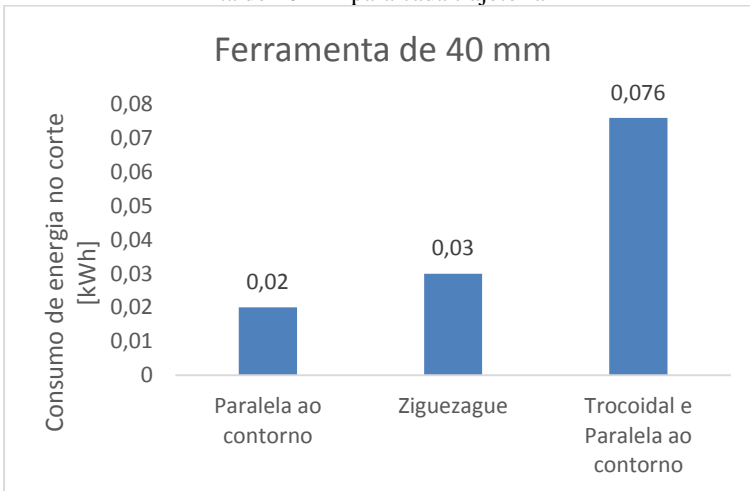


Fonte: Elaboração própria

O menor consumo médio foi apresentado pela trajetória paralela ao contorno, 0,104 kWh, enquanto o consumo médio da trajetória ziguezague foi 0,178 kWh, cerca de 71% acima da anterior. A trajetória na qual o maior consumo total de energia foi observado foi a paralela ao contorno e trocoidal, com consumo médio de 0,254 kWh, aproximadamente 144% acima da trajetória paralela ao contorno e 42,5% acima da trajetória ziguezague.

A diferença entre os valores de consumo total e em vazio é apresentado na Figura 39, e representa o consumo de energia ativa de cada trajetória durante os movimentos nos quais há o corte.

Figura 39 – Consumo de energia durante o movimento de corte com a ferramenta de 40 mm para cada trajetória



Fonte: Elaboração própria

Novamente, a trajetória paralela ao contorno apresentou a menor energia consumida durante o corte, 0,02 kWh, seguida pela trajetória ziguezague, 0,03 kWh. A trajetória trocoidal e paralela ao contorno apresentou o maior consumo no momento do corte, 0,076 kWh.

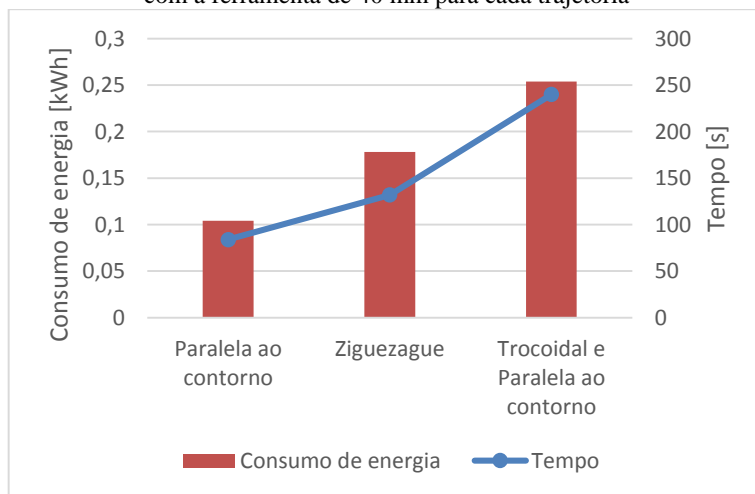
Uma justificativa para os valores apresentados é o tempo de contato entre a peça e a ferramenta. Na trajetória paralela ao contorno a ferramenta permanece em contato com o material da peça durante praticamente todo o processo. Isto faz com que maiores temperaturas sejam alcançadas durante o corte devido ao atrito gerado, diminuindo a resistência do material da peça e facilitando a sua remoção. Com a trajetória ziguezague há contato entre a ferramenta e a peça durante a maior parte

do processo, porém o maior número de reposicionamentos da ferramenta causa interrupção do atrito e, conseqüentemente, as temperaturas alcançadas durante o corte são menores. Já para a trajetória trocoidal e paralela a contorno a ferramenta não tem contato constante com a peça, diminuindo ainda mais as temperaturas alcançadas no processo. A constatação de elevadas temperaturas durante o corte foram feitas através da análise do desgaste dos inserts, apresentada no Apêndice C.

O maior consumo total de energia elétrica é esperado para operações com maiores tempos de processo, porém é necessário avaliar a relação entre o tempo de usinagem e o consumo de energia para estabelecer uma comparação completa das trajetórias.

Na Figura 40 é apresentada a relação entre este consumo de energia e o tempo decorrido no processo de usinagem com a ferramenta de 40 mm para cada caso.

Figura 40 – Relação entre consumo total de energia e tempo gastos na usinagem com a ferramenta de 40 mm para cada trajetória



Fonte: Elaboração própria

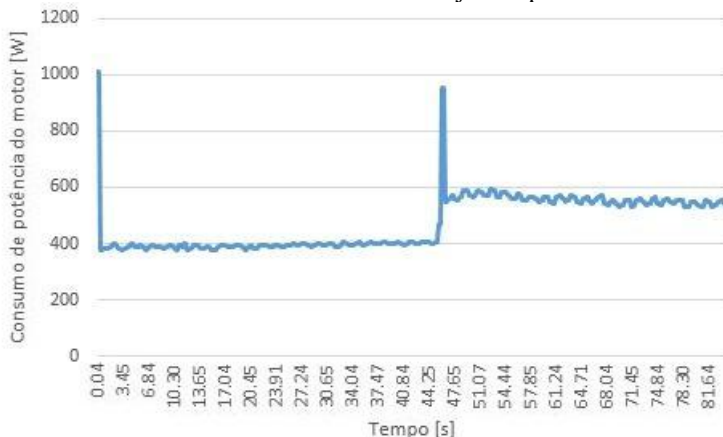
Observa-se que a trajetória ziguezague apresentou uma diferença maior no consumo de energia do que o tempo de usinagem quando comparada à trajetória paralela ao contorno, enquanto o contrário acontece para a trajetória combinada trocoidal e paralela ao contorno em relação à trajetória paralela ao contorno. Quando comparada com a trajetória ziguezague, a trajetória combinada também apresenta maior diferença de tempo do que de consumo de energia.

Isto significa que para uma diferença qualquer entre os tempos dos processos há uma maior diferença de consumo de energia tratando-se da trajetória zigzague, sendo ambas as diferenças em termos de porcentagem.

Além do consumo de energia ativa nos processos, foi realizada uma análise da potência requerida do motor para a realização dos ensaios de cada trajetória.

Nas Figuras 41, 42 e 43 são apresentados os comportamentos do consumo da potência do motor ao longo das trajetórias paralela ao contorno, zigzague e combinada trocoidal e paralela ao contorno realizadas pela ferramenta de 40 mm de diâmetro, respectivamente.

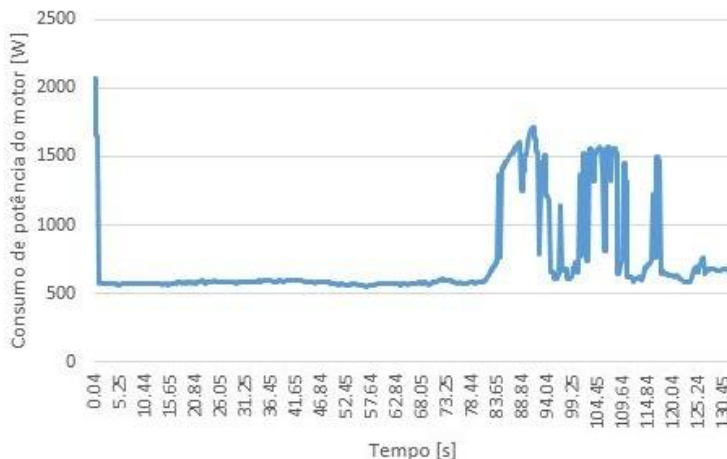
Figura 41 – Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória paralela ao contorno



Fonte: Elaboração própria

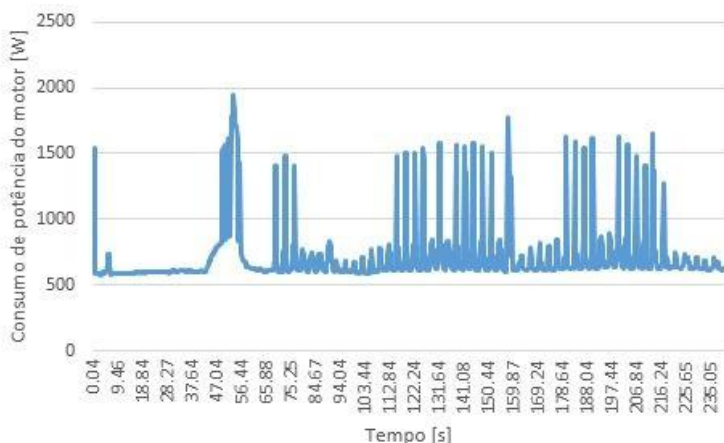
Durante a trajetória paralela ao contorno existem dois picos de potência requerida do motor, que se aproximam de 1000 W. O primeiro é no instante em que a ferramenta toca o material da peça, e o segundo é no instante em que a entrada em rampa da ferramenta é finalizado, após a mesma atingir a profundidade de corte estabelecida, e a ferramenta começa a percorrer a trajetória. Após os dois picos a potência requerida para o corte é estabilizada, sendo em média 400 W para a entrada em rampa da ferramenta na peça, e 550 W para que a ferramenta percorra a trajetória. Essa diferença de valores acontece devido às diferenças entre parâmetros de corte utilizados durante a entrada da ferramenta na peça e durante o corte.

Figura 42 - Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória zigzague



Fonte: Elaboração própria

Figura 43 - Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória trocoidal e paralela ao contorno



Fonte: Elaboração própria

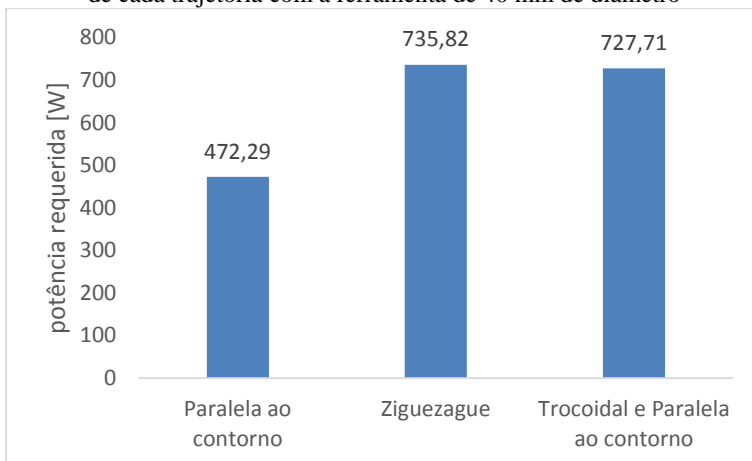
Apesar da entrada da ferramenta na peça ser efetuada em rampa tanto para a trajetória paralela ao contorno quanto para a trajetória zigzague, houveram divergências entre os valores de potência requerida durante a entrada da ferramenta. No caso da trajetória zigzague, o

pico alcançado pelo primeiro contato da ferramenta com a peça chegou a aproximadamente 2000 W, e a potência estabilizou em cerca de 600 W durante grande parte do processo. Após cerca de 83 segundos, houveram grandes oscilações na potência requerida que coincidem com as interrupções no corte causadas pelos constantes reposicionamentos da ferramenta. Devido à estes picos, a potência média requerida durante o ensaio da trajetória ziguezague foi 735,82 W, valor superior à potência requerida pela trajetória paralela ao contorno que foi de 472,29 W.

A entrada em espiral da trajetória trocoidal e paralela ao contorno apresentou um pico de aproximadamente 1500 W e, mais uma vez, a potência estabilizou em torno de 600 W até o fim da entrada da ferramenta na peça. Após este período, é possível observar que a demanda de potência oscila até o final do corte. Estes picos são observados a cada penetração da ferramenta na peça, enquanto os vales representam as potências requeridas enquanto a ferramenta não está em contato com a peça. Apesar da grande quantidade de picos com valores elevados, a potência média requerida para a usinagem do material enquanto a ferramenta realiza uma trajetória trocoidal e paralela ao contorno é inferior à potência requerida durante os ensaios da trajetória ziguezague, 727,71 W. Porém, a trajetória que apresenta a menor potência requerida do motor é a trajetória paralela ao contorno.

Uma comparação das potências médias requeridas durante os ensaios de cada trajetória é apresentado na Figura 44.

Figura 44 – Comparação entre as potências médias requeridas para os ensaios de cada trajetória com a ferramenta de 40 mm de diâmetro

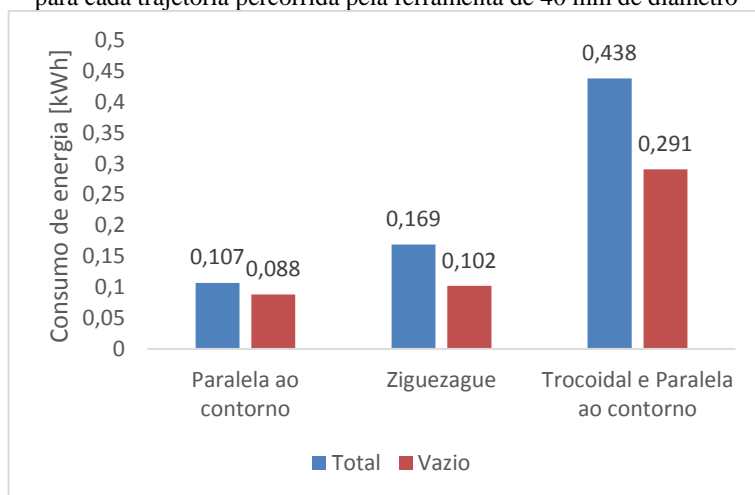


Fonte: Elaboração própria

4.1.2 Desbaste com a ferramenta de 20 mm de diâmetro

A medição do consumo de energia para as estratégias de fresamento realizadas com a ferramenta de 20 mm de diâmetro foi nos mesmos moldes da medição anterior. Cada trajetória foi repetida 10 vezes e, posteriormente, os ensaios foram repetidos em vazio para que fossem obtidos os consumos de energia ativa de cada trajetória apenas durante o corte. Os valores médios obtidos são apresentados na Figura 45.

Figura 45 – Comparação entre os consumos de energia ativa total e em vazio para cada trajetória percorrida pela ferramenta de 40 mm de diâmetro

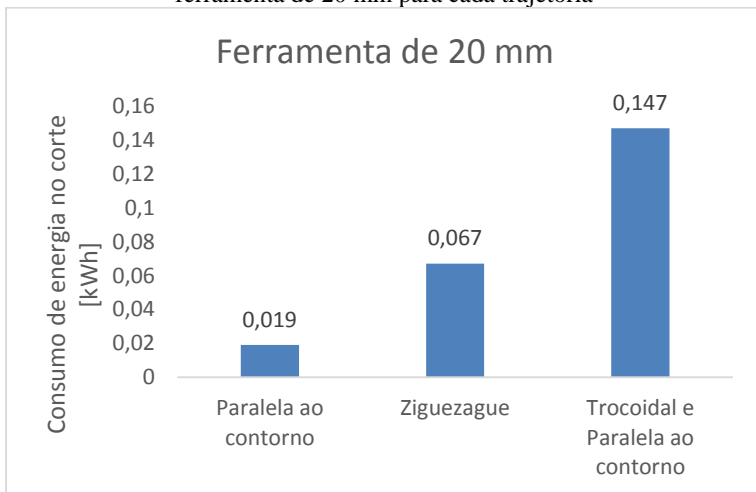


Fonte: Elaboração própria

O menor consumo médio foi, novamente, apresentado pela trajetória paralela ao contorno, 0,107 kWh. Já o consumo médio da trajetória ziguezague foi 0,169 kWh, aproximadamente 58% acima da anterior. A trajetória na qual o maior consumo de energia foi o maior observado foi a trajetória combinada, com consumo médio de 0,438 kWh, 309% acima da trajetória paralela ao contorno e 159% acima da trajetória ziguezague.

Da mesma forma que a ferramenta anterior, a diferença entre os valores do consumo total de energia e os valores do consumo de energia do ensaio em vazio representa o consumo de energia ativa de cada trajetória durante os movimentos nos quais há remoção de material. Estes valores são apresentados na Figura 46.

Figura 46 - Consumo de energia ativa durante o movimento de corte com a ferramenta de 20 mm para cada trajetória



Fonte: Elaboração própria

A trajetória paralela ao contorno apresentou a menor energia consumida durante o corte, 0,019 kWh, seguida pela trajetória ziguezague, 0,067 kWh. A trajetória trocoidal e paralela ao contorno apresentou o maior consumo no momento do corte, 0,147 kWh.

O tempo de contato entre a peça e a ferramenta pode justificar, mais uma vez, os valores apresentados. De maneira semelhante à trajetória percorrida pela ferramenta de 40 mm de diâmetro, na trajetória paralela ao contorno a ferramenta permanece em contato com o material da peça durante praticamente todo o processo. Isto traz a questão das temperaturas alcançadas durante o corte devido ao atrito gerado. O consumo de energia ativa durante o corte apresentado pelas duas ferramentas que percorreram a trajetória paralela ao contorno foi praticamente o mesmo, 0,02 kWh. Este fato é decorrente das áreas independentes que a ferramenta de 20 mm de diâmetro deve usinar, sendo necessários reposicionamentos da ferramenta e envolvendo temperaturas menores durante o processo.

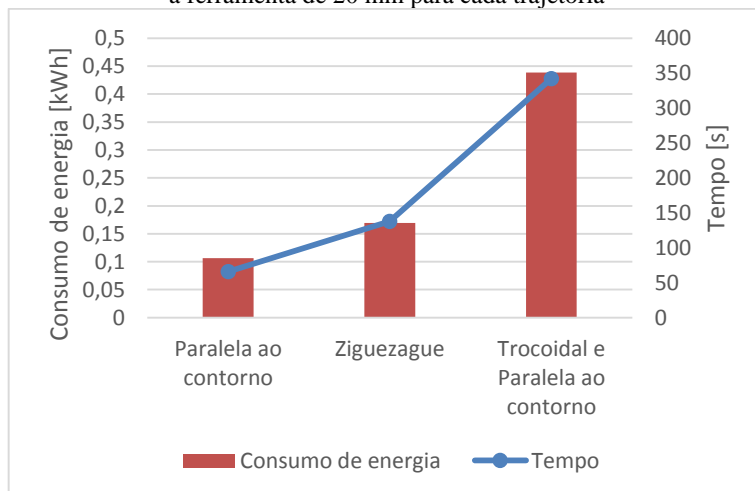
Como para a ferramenta de 40 mm de diâmetro, na trajetória ziguezague há contato entre a ferramenta e a peça durante a maior parte do processo, porém o maior número de reposicionamentos da ferramenta causa interrupção do atrito e, conseqüentemente, as temperaturas alcançadas durante o corte são menores. O consumo de energia ativa apresentado pela ferramenta de 20 mm de diâmetro, percorrendo a trajetória

zigzague, é aproximadamente 2 vezes o consumo apresentado pela ferramenta maior realizando a mesma estratégia. A interrupção do corte para reposicionar a ferramenta até a próxima área a ser usinada pela ferramenta menor justifica os dados obtidos.

No caso da trajetória trocoidal e paralela a contorno a ferramenta não tem contato constante com a peça, diminuindo ainda mais as temperaturas alcançadas no processo e, deste modo, dificultando um pouco mais a remoção do cavaco. Por isto, para ambas as ferramentas a estratégia combinada trocoidal e paralela ao contorno foi a que apresentou o maior consumo de energia durante o corte. O consumo da ferramenta menor para esta estratégia foi cerca de 2 vezes maior do que o consumo da ferramenta maior. Como para as estratégias anteriores, o reposicionamento da ferramenta pode ser responsável pela consumo superior, porém no caso desta estratégia o diâmetro da trocoide também pode ter influência sobre os resultados. O diâmetro maior da trocoide, realizado pela ferramenta de 40 mm de diâmetro, também resulta em um maior tempo de contato entre a ferramenta e a peça e em uma remoção mais fácil do material quando comparada à ferramenta de 20 mm de diâmetro.

Como no processo anterior, a avaliação da relação entre o consumo total de energia elétrica e o tempo decorrido durante o processo se faz necessário para uma melhor comparação das trajetórias. Esta relação é apresentada na Figura 47.

Figura 47 – Relação entre consumo de energia e tempo gastos na usinagem com a ferramenta de 20 mm para cada trajetória



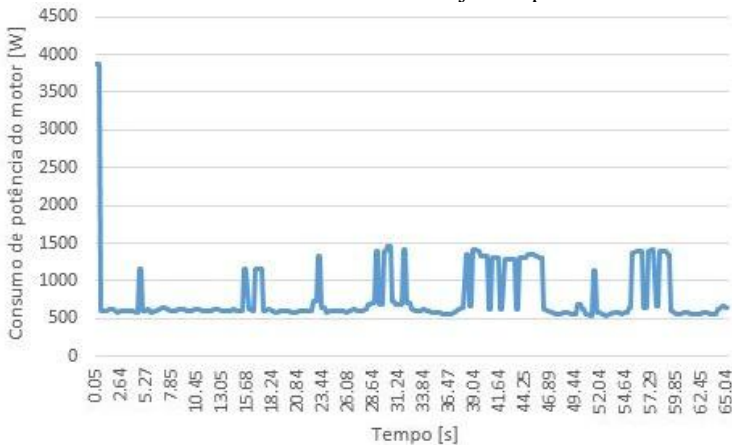
Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar que, neste caso, tanto a trajetória zigzague quanto a trajetória combinada apresentaram uma diferença maior no tempo de usinagem do que no consumo de energia quando comparadas à trajetória paralela ao contorno. Já em comparação com a trajetória zigzague, a trajetória combinada apresentou maior diferença consumo de energia do que de tempo.

Em todas as trajetórias percorridas pela ferramenta de 20 mm a entrada da ferramenta na peça é realizada após a mesma avançar até a profundidade de corte estabelecida para a realização da trajetória, em um área onde já havia sido feita a remoção do material. O corte tem início já percorrendo a trajetória estabelecida com os devidos parâmetros de corte. Devido à entrada abrupta da ferramenta na peça a uma profundidade de corte superior, as potências requeridas nestes ensaios apresentam picos de entrada mais altos quando comparadas com as potências observadas para a ferramenta de 40 mm de diâmetro.

A análise da potência requerida do motor para a realização dos ensaios de cada trajetória percorrida pela ferramenta de 20 mm de diâmetro é apresentada nas Figuras 48, 49 e 50 para representar as trajetórias paralela ao contorno, zigzague e combinada trocoidal e paralela ao contorno, respectivamente.

Figura 48 - Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória paralela ao contorno

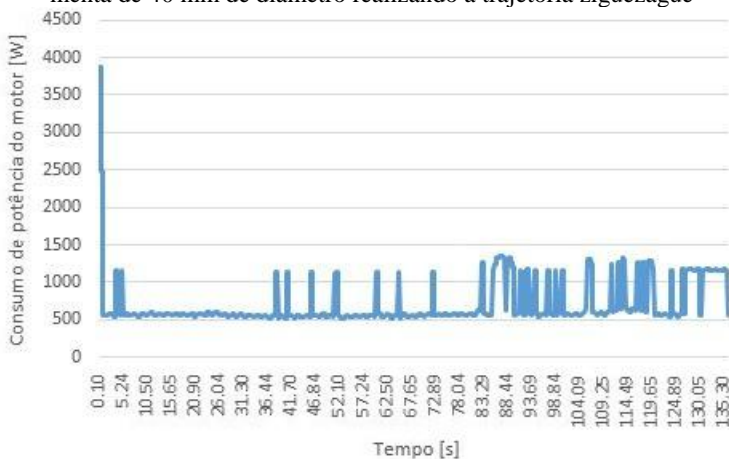


Fonte: Elaboração própria

Durante a trajetória paralela ao contorno a potência média requerida do motor é de 777,03 W. Neste caso, são observados vários

picos de consumo de potência, o que não ocorre na realização da mesma trajetória com a ferramenta de 40 mm de diâmetro. Isto se deve às entradas da ferramenta na peça para a usinagem das áreas estabelecidas, e aos reposicionamentos da ferramenta. Devido à estes picos, a ferramenta menor requer uma potência média maior do motor para a execução da trajetória paralela ao contorno quando comparada à ferramenta de 40 mm de diâmetro.

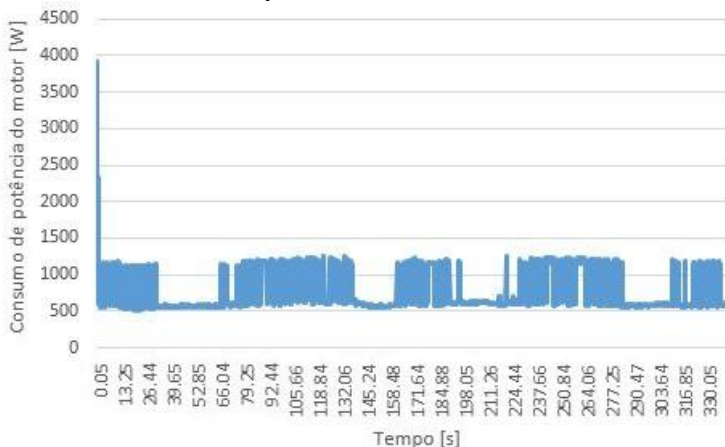
Figura 49 – Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória ziguezague



Fonte: Elaboração própria

Assim como na trajetória paralela ao contorno, o maior valor da potência requerida do motor é observada no primeiro contato da ferramenta com a peça, cerca de 4000 W. Durante a execução da trajetória ziguezague pela ferramenta de 20 mm foram observadas maiores oscilações na potência consumida quando comparada à execução da trajetória paralela ao contorno com as mesma ferramenta. Isto acontece porque, além dos reposicionamentos e entradas necessários para a usinagem das áreas independentes estabelecidas, existem reposicionamentos e entradas da ferramenta durante a própria trajetória. O consumo médio apresentado após a execução da trajetória ziguezague com a ferramenta de 20 mm de diâmetro foi de 708,25 W, valor inferior tanto ao apresentado após a execução da trajetória paralela ao contorno com a mesma ferramenta, quanto ao apresentado após a execução da trajetória ziguezague pela ferramenta de 40 mm.

Figura 50 - Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 40 mm de diâmetro realizando a trajetória combinada trocoidal e paralela ao contorno

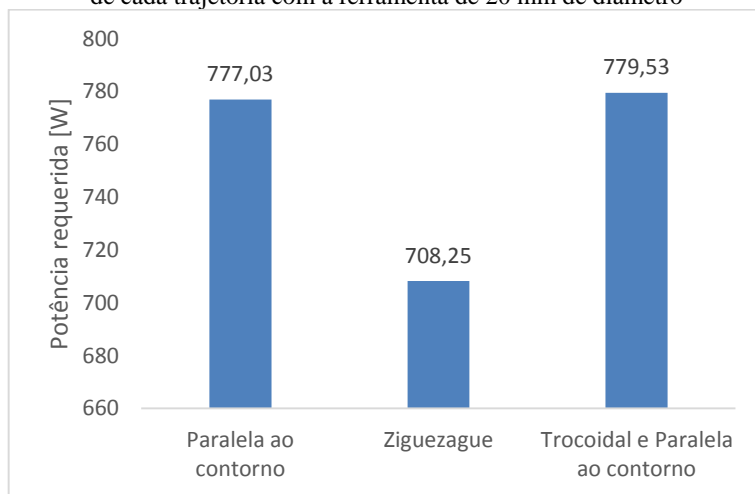


Fonte: Elaboração própria

A entrada da ferramenta de 20 mm de diâmetro na peça foi realizada da mesma forma para todas as trajetórias. A potência requerida do motor no primeiro contato da ferramenta com a peça foi o maior pico observado para todas as trajetórias, e os valores apresentados foram semelhantes, cerca de 4000 W. A trajetória paralela ao contorno e trocoidal foi a que apresentou a maior oscilação nos valores de potência consumida do motor, devido à constante alternância entre os movimentos que efetuam remoção de material durante a execução da trajetória, e os movimentos nos quais não ocorre remoção. Devido à grande quantidade de picos com valores elevados, a potência média requerida para a usinagem do material enquanto a ferramenta realiza uma trajetória trocoidal e paralela ao contorno é superior à potência média requerida tanto durante os ensaios da trajetória zigzague quanto durante os ensaios da trajetória paralela ao contorno, 779,53 W. Quando comparada à potência média requerida para a realização da trajetória trocoidal e paralela ao contorno pela ferramenta de 40 mm de diâmetro, novamente, o maior valor é observado para a ferramenta menor. Isto se deve ao fato das trocoides realizadas pela ferramenta menor possuírem diâmetros expressivamente menores do que as trocoides executadas pela ferramenta maior, causando mais entradas da ferramenta na peça.

Uma comparação das potências médias requeridas durante os ensaios de cada trajetória é apresentado na Figura 51.

Figura 51 – Comparação entre as potências médias requeridas para os ensaios de cada trajetória com a ferramenta de 20 mm de diâmetro



Fonte: Elaboração própria

4.2 Análise da sustentabilidade dos processos

Esta análise será realizada considerando-se os três fundamentos da sustentabilidade, apresentados na seção 2.1 deste trabalho.

4.2.1 Aspecto social

O primeiro fundamento analisado é o aspecto social dos processos realizados. O fator mais importante, quando menciona-se o aspecto social dos ensaios realizados, é a ausência do fluido lubrificante e a presença apenas do ar comprimido como fluido de corte para a remoção do cavaco da zona de corte. Sem os fluidos lubrificantes os operadores não são expostos a substâncias que podem ser prejudiciais à saúde. Porém, ao utilizar o ar comprimido nos ensaios, foi gerado um ruído muito elevado, acima de 90 dB, o que causou um desconforto nas pessoas presentes durante os ensaios devido ao tempo de exposição, mesmo com a utilização de EPI's (equipamento de proteção individual). Pessoas submetidas a ruídos elevados durante longos períodos podem apresentar problemas auditivos e fisiológicos permanentes, por isso é necessária uma análise do dispositivo antes de sua utilização em ambientes fabris.

4.2.2 Aspecto ambiental

Para todas as trajetórias a carga ambiental foi significativamente reduzida, em termos de contaminação ambiental, com a ausência de fluidos de corte à base de óleos ou sintéticos. Porém, a utilização de ar comprimido pode aumentar significativamente o consumo de energia apresentado durante o processo devido à necessidade de acionar alguns componentes específicos para a sua utilização, como o compressor, a rede de distribuição do ar comprimido e o motor elétrico. Como já foi mencionado, a geração de energia elétrica está ligada à diversas cargas ambientais, e a diminuição do seu consumo deve ser incentivado.

Como apresentado neste capítulo, as trajetórias que menos consumiram energia ativa total, somando-se as duas ferramentas (40 mm e 20 mm), em ordem crescente foi a trajetória paralela ao contorno, a trajetória zig-zague e a trajetória combinada trocoidal com paralela ao contorno. A mesma ordem se aplica à soma dos consumos de energia, apenas durante o corte, de cada ferramenta para as trajetórias executadas, em ordem crescente.

Quando a potência requerida do motor para a realização dos ensaios é comparada, observa-se que para a usinagem da região 'A' a trajetória paralela ao contorno requereu uma potência menor e as demais trajetórias requereram uma potência semelhante. No caso da região 'B', a trajetória zig-zague consumiu menos potência do motor, enquanto as demais trajetórias consumiram aproximadamente a mesma potência.

4.2.3 Aspecto econômico

Em relação ao último fundamento da sustentabilidade abordado neste trabalho, é possível realizar uma análise do consumo de energia similar ao apresentado para o aspecto ambiental. A trajetória paralela ao contorno apresentou o menor consumo total de energia ativa, 0,211 kWh, seguida da trajetória zig-zague, 0,347 kWh, e finalmente a trajetória trocoidal e paralela ao contorno, 0,692 kWh. Considerando que o mesmo valor será pago pelo kWh, a trajetória paralela ao contorno pode ser considerada a mais econômica para a usinagem da cavidade proposta, seguida da trajetória zig-zague, e da trajetória trocoidal e paralela ao contorno.

Além do consumo de energia, a análise econômica do processo deve abranger os custos com operadores e custos com ferramenta. Maiores tempos de usinagem significam mais tempo de disponibilidade do operador e, conseqüentemente, mais custo. No caso das trajetórias propostas, a trajetória trocoidal e paralela ao contorno representaria o maior

custo neste aspecto, seguida pela trajetória zigzague. O menor custo seria alcançado com a realização da trajetória paralela ao contorno.

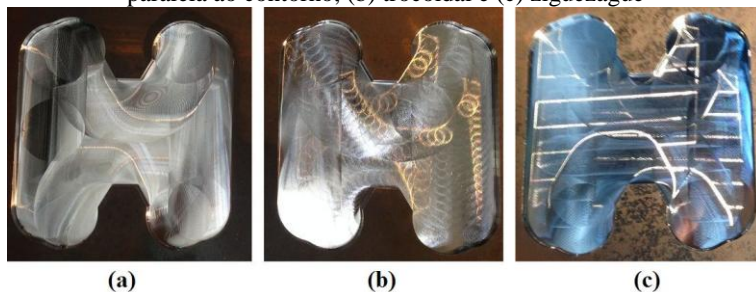
Os tempos de usinagem elevados podem estar associados à baixas velocidades de corte e, conseqüentemente, maiores vidas de ferramentas. Nos casos apresentados neste trabalho foram utilizadas as mesmas velocidades de corte para a realização dos ensaios de cada trajetória com a mesma ferramenta, diferindo apenas as velocidades de corte entre as ferramentas utilizadas. Os tempos de usinagem apresentados estão, portanto, associados ao comprimento das trajetórias executadas.

Não foram apresentados desgastes significativos nos insertos devido aos parâmetros de corte selecionados, como é possível observar no Apêndice C. Portanto, não é possível afirmar se os insertos submetidos à maiores tempos de usinagem apresentaram desgastes maiores ou menores. Contudo, está é uma análise que deve ser realizada em ambientes com produções seriadas.

4.3 Geometrias obtidas

Conforme estabelecido no capítulo anterior, cada ferramenta é responsável pela remoção de material de uma área específica da cavidade, sendo esta área a mesma para cada trajetória estudada. A área usinada nos ensaios pela ferramenta de 40 mm, adotando-se as trajetórias paralela ao contorno, trocoidal e zigzague, são apresentadas na Figura 52a, b e c, respectivamente. Percebe-se que a área removida é a mesma para todas as trajetórias, conforme foi proposto.

Figura 52 - Cavidades usinadas pela fresa de 40 mm com as trajetórias: (a) paralela ao contorno, (b) trocoidal e (c) zigzague



Fonte: Elaboração própria

Para a obtenção da geometria final definida no projeto, foi necessário utilizar uma fresa com 20 mm de diâmetro. O volume usinado

por esta ferramenta é pré-estabelecido e mantido constante para as três trajetórias. Na Figura 53 é apresentada a cavidade na sua forma final, onde a região usinada pela fresa de 20 mm de diâmetro em uma trajetória trocoidal é destacada pela penetração vertical um pouco inferior que a área usinada pela ferramenta de 40 mm de diâmetro.

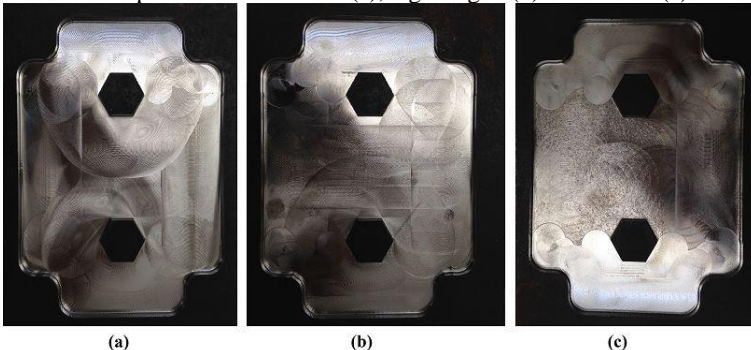
Figura 53 - Áreas fresadas com a fresa de 40 mm de diâmetro usinadas por cada ferramenta durante os ensaios (região mais profunda) e pela fresa de 20 mm de diâmetro em trajetória trocoidal



Fonte: Elaboração própria

Na Figuras 54 são apresentadas as cavidades finalizadas com a ferramenta de 20 mm de diâmetro, usinadas utilizando-se as trajetórias paralela ao contorno (a), ziguezague (b) e trocoidal (c).

Figura 54 – Cavidades finalizadas com a fresa de 20 mm usinadas com as trajetórias paralela ao contorno (a), ziguezague (b) e trocoidal (c)



(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaboração própria

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões obtidas mediante a análise dos resultados, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

No presente trabalho foram analisados três tipos de trajetórias de fresamento adotadas para a operação de desbaste de cavidades, que foi realizada com a combinação de duas ferramentas de corte. O objetivo foi estudar o consumo de energia elétrica e, a partir desta análise, avaliar a trajetória que apresenta a melhor relação custo/benefício em termos de sustentabilidade.

As medições de energia elétrica mostraram que os maiores consumos não devem ser, necessariamente, associados à maior área a ser usinada ou ao maior tempo de operação. Verificou-se que fatores como os reposicionamentos da ferramenta, a diminuição da resistência do material devido às temperaturas alcançadas durante o processo e o comprimento do caminho realizado pela ferramenta têm maior influência no consumo total médio de energia, partindo-se do pressuposto de que os parâmetros de corte adotados para cada ferramenta não variam entre as trajetórias. Por isso ocorreram divergências quanto à região que apresentou os maiores consumos totais médios de energia para sua usinagem, sendo a região 'A' para a trajetória zigzague, e a região 'B' para as trajetórias paralela ao contorno e combinada trocoidal/paralela ao contorno.

Além da energia total gasta pela máquina-ferramenta durante a realização dos ensaios, o consumo de energia gasto somente durante os movimentos de corte e as potências requeridas para os ensaios também apresentaram divergências quanto à região na qual o menor consumo foi observado para cada trajetória. O menor consumo de energia ativa para a realização do corte foi observada na região 'B' para a trajetória paralela ao contorno, e na região 'A' para as demais trajetórias. Em relação à potência requerida, o menor valor foi observado na região 'B' para a trajetória zigzague, e na região 'A' para as demais trajetórias.

Os três fundamentos da sustentabilidade foram incluídos na análise da sustentabilidade dos processos realizados. A ausência de fluidos de corte à base de óleos contribuiu para tornar o processo mais sustentável no aspecto ambiental e melhor para o operador, que não é exposto a

substâncias nocivas, no aspecto social. Entretanto, os ruídos gerados pela aplicação do ar comprimido apontam para que o processo seja considerado insalubre para os operadores.

Para a usinagem da cavidade proposta com os parâmetros e variáveis estabelecidos, e considerando todas as análises realizadas, a melhor trajetória entre as apresentadas para a usinagem da região 'A' é a ziguezague, enquanto para a região 'B' é a paralela ao contorno. Os altos valores de consumo de energia e tempo de usinagem apresentados pela trajetória combinada, quando comparados às demais trajetórias executadas, inviabilizam sua aplicação em ambientes industriais comuns com os parâmetros utilizados neste trabalho. É necessário avaliar as aplicações para que a trajetória combinada seja utilizada em áreas reduzidas, além de ser primordial a otimização dos parâmetros de geração desta trajetória para torná-la competitiva e aplicável na indústria.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados ao consumo de energia e sustentabilidade no fresamento de cavidades com mais de uma ferramenta, e ao processo de fresamento como um todo:

- Realizar a otimização dos parâmetros de corte, de modo a minimizar o consumo de energia;
- Realizar um estudo com profundidades de corte superiores, de forma a viabilizar uma comparação válida do desgaste das ferramentas;
- Estudar a diferença entre o consumo de energia apresentado por um processo com corte a seco, que é um processo mais sustentável, e o consumo de energia apresentado por um processo que utiliza fluido de corte;
- Aprofundar a análise da influência de trajetórias no processo de fresamento, incluindo uma análise econômica quantitativa das operações;
- Realizar um estudo em parceria com uma empresa, onde haja produção em série de peças pelo processo de fresamento, a fim de avaliar a influência das trajetórias no consumo de energia e desgaste de ferramentas em produções seriadas;
- Estudar o comportamento de outros materiais como ferramenta de corte para o fresamento de aços, com vistas ao consumo de energia, análise econômica e sustentabilidade.

- Realizar uma análise de eficiência energética do processo de fresamento de cavidades para diferentes trajetórias e combinações.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. O. et al. Influência da Direção de Aplicação do Fluido de Corte na Temperatura da Interface Cavaco-Ferramenta. **4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 2007.
- ANDRADE, R. R. **Estudo da Relação entre as Principais Estratégias de Fresamento de Cavidades na Usinagem de Moldes Termoplásticos**. Trabalho de conclusão de curso, Escola de Engenharia de Piracicaba, Piracicaba, 2012.
- ASHBY, M. F. **Materials and the Environment: Eco-Informed material choice**. Elsevier Inc., 2013.
- BIETERMAN, M. B.; SANDSTROM, D. R. A Curvilinear Tool-Path Method for Pocket Machining. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. v. 125, p. 709-715. 2003
- CARVALHO, H. M. B. **Metodologia de Avaliação e Aumento da Eficiência Energética em Manufatura de Elementos Discretos: Aplicação em Usinagem**, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2015.
- CATIA DOC. **Trochoid Milling Operations**. Disponível em: <http://catiadoc.free.fr/online/pmgug_C2/pmgugrf0170.htm>. Acesso em: 12 set. 2015.
- CHEN, Z. C.; FU, Q. An Optimal Approach to Multiple Tool Selection and their Numerical Control Path Generation for Aggressive Rough Machining of Pockets with Free-form Boundaries. **Computer-Aided Design**. v. 43, p. 651-663. 2011.
- CHETAN; GHOSH, S.; RAO, P. V. Application of Sustainable Techniques in Metal Cutting for Enhanced Machinability: A Review. **Journal of Cleaner Production**. v. 100, p. 17-34. 2015.
- CHOY, H. S.; CHAN, K. W. Machining Tactics for Interior Corners of Pockets. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 20, p. 741-748. 2002.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 6ª Edição. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2008.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1ª Edição. São Paulo: Editora Blucher, 1970.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais: furação, alargamento, fresamento, e processos não convencionais**. São Paulo: Associação brasileira de metais, 1973.

FERREIRA, J.C.E.; OCHOA, D.M. A Method for Generating Trochoidal Tool Paths for 2½D Pocket Milling Process Planning with Multiple Tools, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 227, p. 1287-1298. 2013.

GONZÁLEZ, D. M. O. **Método de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para o fresamento de desbaste de cavidades 2,5D com múltiplas ferramentas**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

GUARNIZO, A. R. **Desenvolvimento de um método para a geração de trajetórias para o fresamento de cavidades em peças prismáticas com múltiplas ferramentas**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

IBARAKI, S.; YAMAJI, I.; MATSUBARA, A. On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving, **Precision Engineering**, v. 34, p. 467-473. 2010.

KIM, B. H.; CHOI, B. K. Machining Efficiency Comparison Direction-Parallel Tool Path with Contour-Parallel Tool Path. **Computer-Aided Design**. v. 34, p. 89-95. 2002.

KONG, D. et al. Software Based Tool Path Evaluation for Environmental Sustainability. **Journal of Manufacturing Systems**. v. 30, p. 241-247. 2011.

KLOCKE, F. KÖNIG W. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 8th Edition. Springer. 2007.

KRON. **Conversor KR-485/USB**. Disponível em: <<http://www.kron.com.br/br/produto-289-conversor-kr-485-usb>>. Acesso em: 10 out. 2015.

KRON. **Mult-K 120**. Disponível em: <<http://www.kron.com.br/br/produto-13-mult-k-120-multimedidor-energia-agua-gas>>. Acesso em: 10 out. 2015.

KYOCERA. **High Efficient Endmills MEC Series**: Catalog. 2011.

LABUSCHAGNE, C.; BRENT, A. C.; ERCK, R. P. G. Assessing the sustainability performances of industries, **Journal of Cleaner Production**, v. 13, p. 373-385. 2005.

LIN, Z. et al. Smooth Contour-Parallel Tool Path Generation for High-Speed Machining Through a Dual Offset Procedure. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 81, p. 1233-1245. 2015.

LINDE, C. van der; PORTER, M. E. Green and competitive: ending the stalemate, **Journal of Business Administration and Policy Analysis**, p. 215. 1999

LISBOA, F. C.; MORAES, J. J. B.; HIRASHITA, M. A. Fluidos de Corte: Uma Abordagem Geral e Novas Tendências. **XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2013.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1ª Edição. São Paulo: Editora Bluncher, 2009.

MELO, J. F. N. **Monitoramento da Evolução do Desgaste de uma Ferramenta de Corte através de Vibrações**. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

MONREAL, M.; RODRIGUEZ, C. A. Influence of Tool Path Strategy on the Cycle Time of High-Speed Milling. **Computer-Aided Design**. V. 35, p. 395-401. 2003.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MOTTA, L. A. **Desenvolvimento de Ferramenta Especial para Obter Melhorias no Processo de Usinagem de Hastes Sulcadoras de Plantadeiras**. Monografia de Graduação. Faculdade Horizontina, Horizontina, 2014.

NEVES, T. E. S. B. **Investigação da Influência da Aplicação de Óleos Vegetais Comestíveis como Fluido de Corte no Processo de Furação do Aço ABNT 1045**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

NEWMAN, S. T. et al. Energy efficient process planning for CNC machining, **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 5, p. 127 – 136. 2012.

OTKUR, M.; LAZOGLU, I. Trochoidal Milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 47, p. 1324-1332. 2006.

PENG, T.; XU, X. Energy-efficient machining systems: a critical review, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, p. 1389-1406. 2014.

PEREIRA, M. G. et al. Limpeza da Superfície de Corte de Rebolos por um Sistema de Ar Comprimido na Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho de Materiais Cerâmicos Refrigerados com a Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. 2010.

RAUCH, M.; DUC, E.; HASCOET, J.-Y. Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, p. 375-383. 2009.

SANDVIK-COROMANT. **Manual Técnico**. Estocolmo, 2010.

SANDVIK-COROMANT. **Fresamento: Posição da fresa**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/cutter_position>. Acesso em: 30 jul. 2015.

SANDVIK-COROMANT. **Coromill 490**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coromill_490/Pages/default.aspx>. Acesso em: 10 ago. 2015.

SANDVIK-COROMANT. **Coromill Plura**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coromill_plura/Pages/Product-details.aspx>. Acesso em: 10 ago. 2015.

SIKDAR, S. K. Sustainable development and sustainability metrics, **AICHe Journal**, v. 49, n. 8, p.1928-1932. 2003.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. Processos de Fabricação Metal-Mecânica Parte 2: **Tecnologia da Usinagem**. Florianópolis, 2002. (Apostila)

SHEEN, B. T.; YOU, C. F. Tool Path Generation for Arbitrary Pockets with Islands. **Journal of Intelligent Manufacturing**. v. 17, p. 275-283. 2006.

SILVA, O. F. M.; CAVENAGHI, V.; BARROS, G. C. S. Desempenho nos sistemas de operações: A contribuição da manufatura sustentável em uma empresa gráfica, **International Workshop Advances in Cleaner Production**, 3rd Edition, São Paulo, 2011.

SILVA, F. C. S. et al. Análise do Torneamento do Aço Inoxidável ABNT 304 Através da Temperatura do Cavaco. **17º Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica**. 2007.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**: Brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos. 2ª Edição. Florianópolis: Editora UFSC, 1995.

SUH, Y. S.; LEE, K. NC milling tool path generation for arbitrary pockets defined by sculptured surfaces, **Butterworth-Heinemann Ltd**, v. 22, n. 5, p. 273 – 284. 1990.

VELEVA, V. et al. Indicators of sustainable production, **Journal of Cleaner Production**, v. 9, p. 447 – 452. 2001.

VENTURA, C. E. H. **Estudo dos Esforços de Corte no Processo HSM Aplicado à Abertura de Cavidades**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

VIEGAS, J. C.; SALLES, M. T. A. Sustentabilidade em projetos de produto: uma abordagem ambiental, **VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**, 2012.

XIONG, Z. H.; ZHUANG, C. G.; DING, H. Curvilinear Tool Path Generation for Pocket Machining. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 225, p. 483-495. 2010.

YAN, J.; LI, L Multi-objective optimization of milling parameters: the trade-offs between energy, production rate and cutting quality, **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 462 – 471. 2013.

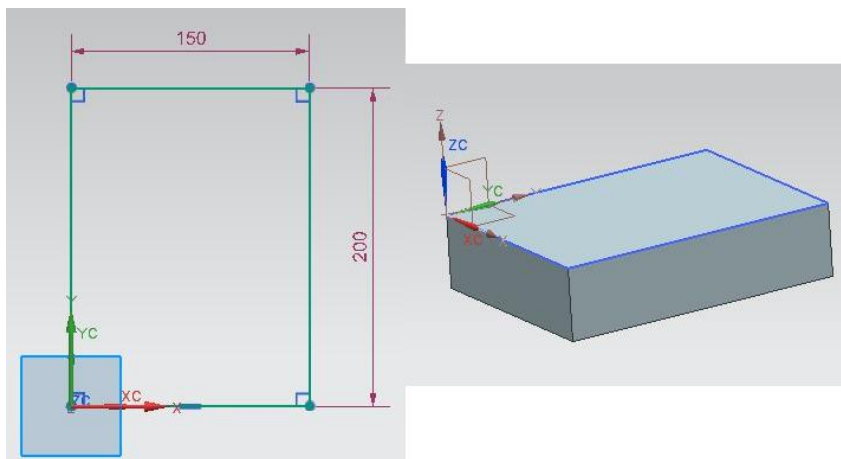
ZEILMANN, R. P. et al. Implications of the Reduction of Cutting Fluid in Drilling AISI P20 Steel with Carbide Tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 58, p. 431-441. 2012.

ZHIWEI L. et al. A Robust 2D Point-Sequence Curve Offset Algorithm with Multiple Islands for Countour-Parallel Tool Path. **Computer-Aided Design**. v. 45, p. 657-670. 2013.

APÊNDICE A – Projeto da cavidade

O projeto da cavidade adotada neste estudo foi feito utilizando-se o módulo CAD do programa UGS NX. O primeiro passo foi um esboço retangular de 150x200 mm seguido de uma operação de extrusão que conferiu ao bloco a espessura de 50 mm, conforme ilustrado na Figura A.1. Estas são as dimensões das matérias-primas disponíveis para os ensaios.

Figura A. 1 - Modelo em CAD do bloco utilizado nos ensaios e suas dimensões

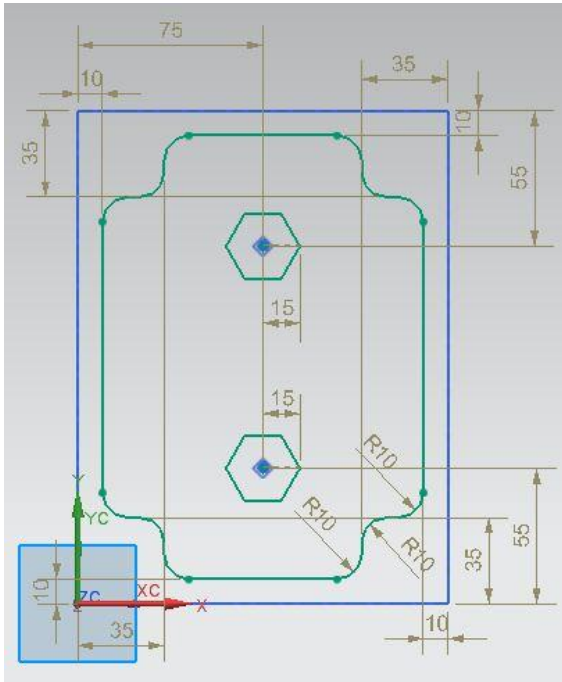


Fonte: Elaboração própria

Um segundo esboço foi feito na face frontal do bloco, desta vez contendo as informações da cavidade usinada, seguido mais uma vez de uma operação de extrusão, mas desta vez subtraindo material do bloco, dando origem à cavidade. O raio de concordância é o mesmo para todos os cantos e tem valor de 10 mm, como ilustrado em três pontos do esboço.

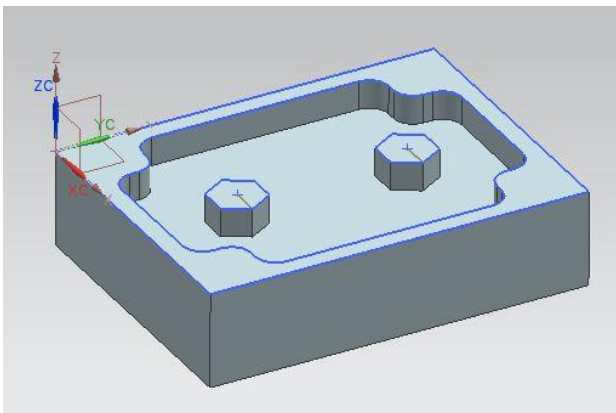
A cavidade possui duas ilhas hexagonais idênticas de lado 15 mm. Estas ilhas estão igualmente distanciadas das bordas da cavidade, tornando a geometria completamente simétrica em relação aos eixos X e Y. O esboço com as dimensões da cavidade e suas ilhas é apresentado na Figura A.2, enquanto a geometria final é apresentada na Figura A.3.

Figura A. 2 - Dimensões da cavidade adotada e de suas ilhas



Fonte: Elaboração própria

Figura A. 3 - Geometria final da cavidade obtida com o software UGS NX



Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE B – Geração das Trajetórias

Para um maior detalhamento do processo de geração das trajetórias e para possibilitar a reprodução do presente estudo, são apresentadas a seguir as principais etapas do referido processo utilizando-se o *software* UGS-NX. Primeiramente serão apresentadas as etapas comuns a todas as trajetórias.

O primeiro passo consiste em definir o tipo de operação a ser realizada, neste caso a operação é denominada *mill_contour*, que caracteriza a operação de fresamento a partir do contorno da geometria em questão. Para a fresa de 40 mm o subtipo da operação é o fresamento de cavidades (*cavity mill*), enquanto para a fresa de 20 mm o subtipo da operação é a remoção do material que restou na operação anterior (*rest material*). Uma captura de imagem da etapa de definição das operações de cada ferramenta é apresentada na Figura B.1. Apesar destas etapas serem apresentadas juntas, é necessária a geração definitiva da cada trajetória referente a cada ferramenta na sequência em que elas serão utilizadas.

Além de definir as operações é preciso criar no *software* as ferramentas que serão utilizadas antes de iniciar efetivamente o processo de geração das trajetórias. Pode-se salvar estas ferramentas para uso posterior e, para isso, criam-se identificações e descrições de cada ferramenta a fim de facilitar a seleção nas utilizações futuras. Caso já existam ferramentas salvas no *software* é necessária apenas a seleção da ferramenta desejada na biblioteca.

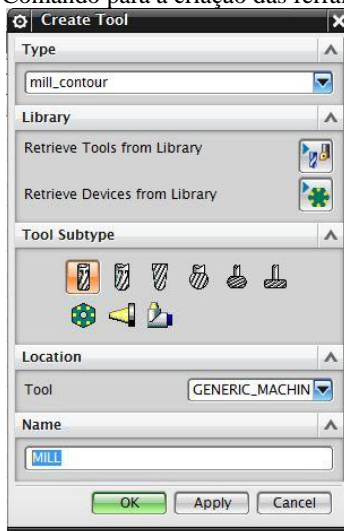
Para criar uma nova ferramenta existe o comando criar ferramenta (*create tool*), mostrado na Figura B.2. Em um primeiro momento deve-se selecionar o tipo de fresa a ser utilizada, no caso das duas ferramentas seleciona-se a fresa de topo (*end mill*). Em seguida deve-se definir todas as características destas ferramentas, como diâmetro, material, comprimento, número de insertos, tipo e tamanho do suporte, entre outros. Esta etapa é apresentada por uma captura de tela na Figura B.3. Existe a possibilidade de criar ferramentas sem que uma operação seja selecionada, ou criar ferramentas após a definição de uma operação.

Figura B. 1 - Definição da operação: (a) realizada pela fresa de 40 mm, e (b) realizada pela fresa de 20 mm



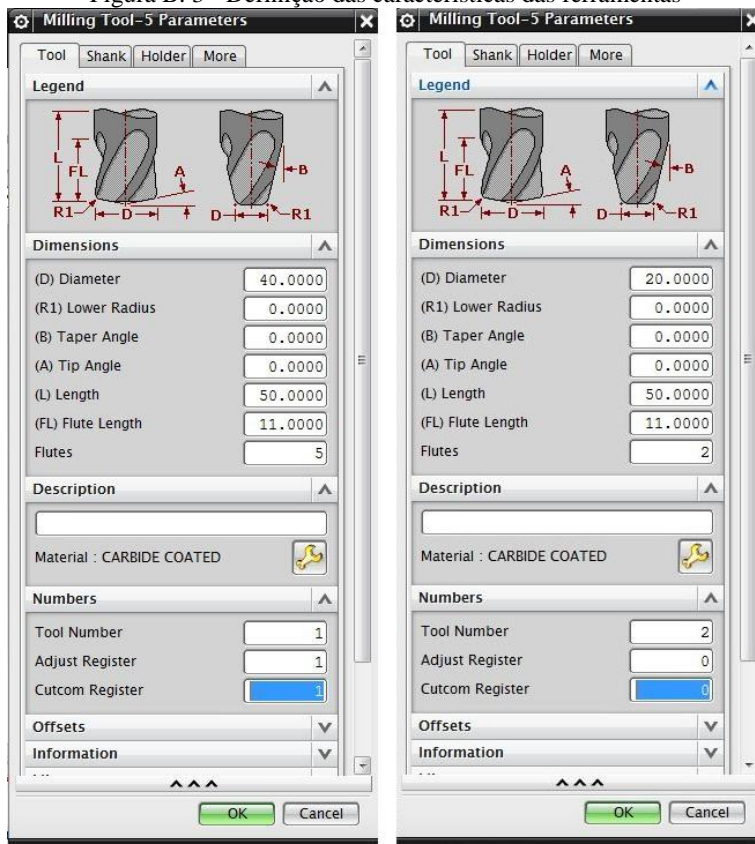
Fonte: Elaboração própria

Figura B. 2 - Comando para a criação das ferramentas



Fonte: Elaboração própria

Figura B. 3 - Definição das características das ferramentas



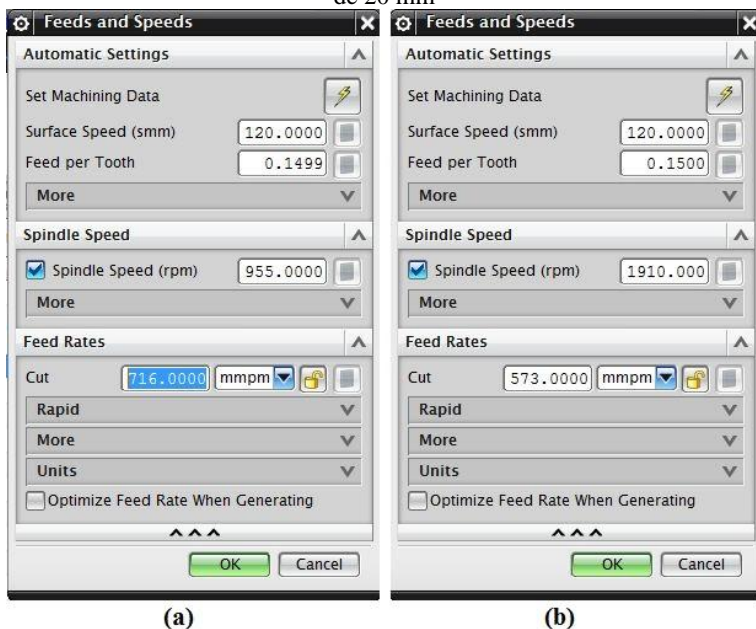
(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

Após definir as operações e as ferramentas, são iniciadas etapas mais específicas referentes à geração de cada trajetória. Uma destas etapas é a definição dos parâmetros de corte. Cada ferramenta possui parâmetros diferentes, porém estes parâmetros não variam entre as trajetórias, ou seja, os mesmos parâmetros devem ser especificados na aba *feeds and speeds* do *software*. Os parâmetros que devem ser especificados nesta etapa são velocidade de corte, avanço por dente, velocidade de rotação da ferramenta e velocidade de avanço, conforme apresentado na Figura B.4.

Figura B. 4 - Parâmetros de corte: (a) para a fresa de 40 mm, e (b) para a fresa de 20 mm



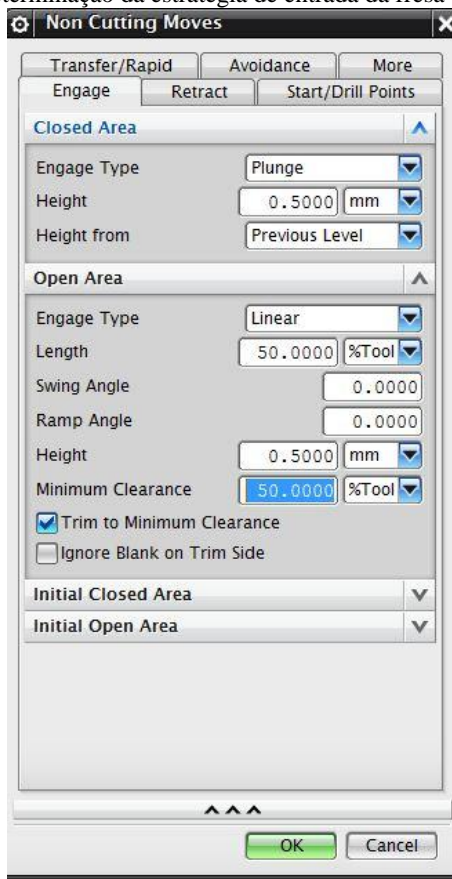
Fonte: Elaboração própria

Outra etapa do processo de geração das trajetórias é determinar a estratégia de entrada da ferramenta na peça. Esta determinação é feita na aba *non cutting moves*, onde as especificações de movimentos que não removem material também são feitas. Entre estas especificações estão a aproximação e o afastamento da ferramenta em relação à peça, o ponto no qual a ferramenta entrará na peça, entre outras apresentadas na Figura B.5.

Neste estudo, a entrada da ferramenta de 40 mm na peça não foi a mesma em todas as trajetórias, ao contrário da ferramenta de 20 mm. Em todos os casos a ferramenta de 20 mm efetuou uma descida linear em mergulho até o nível determinado para o início do corte (0,5 mm), e só então penetrou o material da peça já realizando a trajetória estabelecida.

Apenas os parâmetros de corte e a entrada da ferramenta de 20 mm na peça é comum a todas as trajetórias, as demais etapas são realizadas individualmente por se tratarem de características específicas de cada estratégia de fresamento.

Figura B. 5 – Determinação da estratégia de entrada da fresa de 20 mm na peça

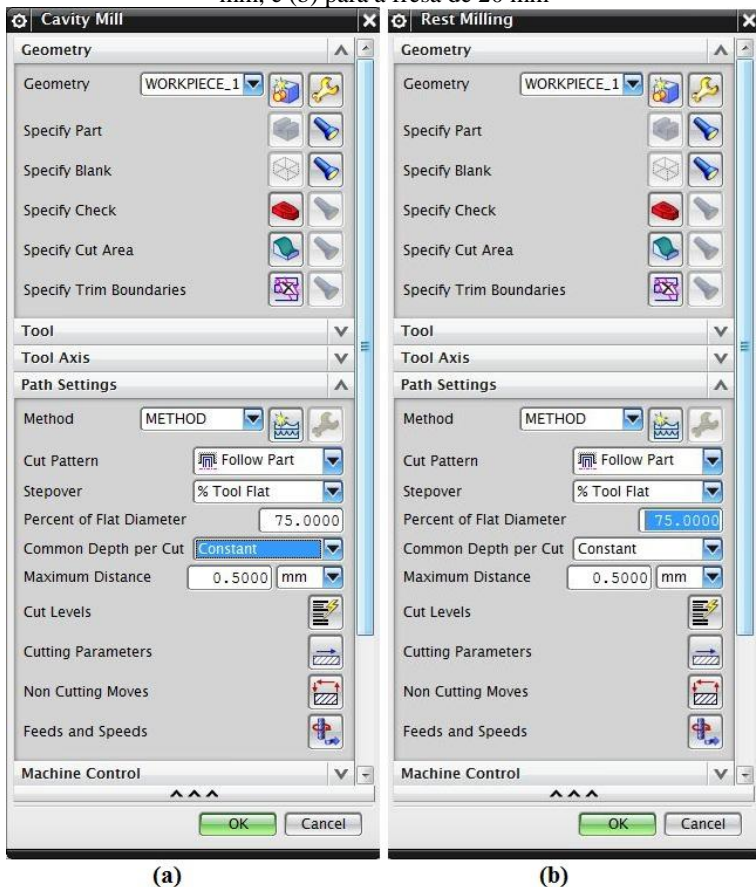


Fonte: Elaboração própria

Trajetória paralela ao contorno

Gerar as trajetórias utilizando o *software* UGS-NX é um processo complexo devido ao elevado número de variáveis que influenciam na tomada de decisões. Na Figura B.6 são apresentados todos os aspectos que envolvem a geração de trajetórias. Os parâmetros da seção *feeds and speeds* foram apresentados anteriormente, assim como as especificações da seção *non cutting moves* para a ferramenta de 20 mm. A seguir serão apresentados os parâmetros que devem ser estabelecidos nas demais seções a fim de gerar a trajetória desejada.

Figura B. 6 - Definições da trajetória paralela ao contorno: (a) para a fresa de 40 mm, e (b) para a fresa de 20 mm

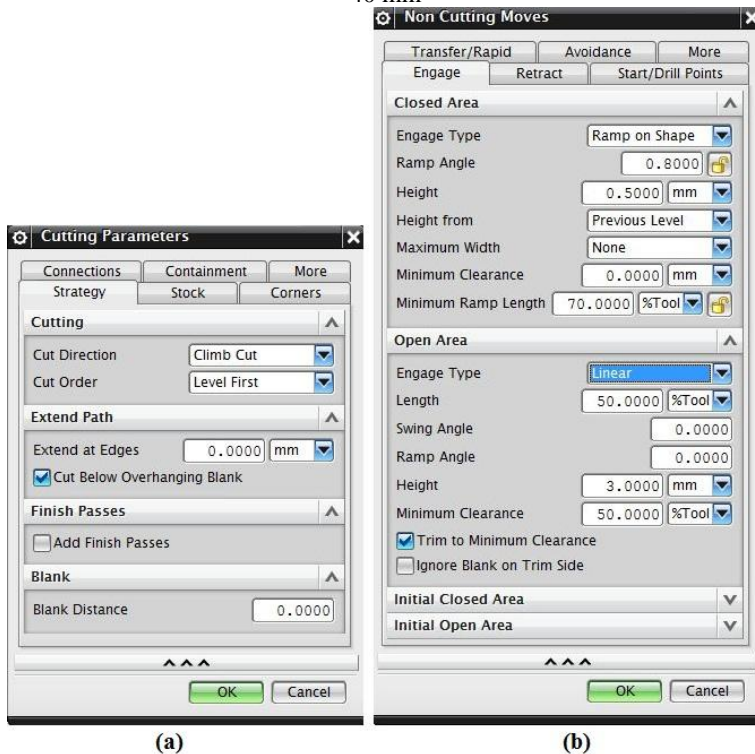


Fonte: Elaboração própria

Na Figura B.7a e B.7b são apresentadas as seções *cutting parameters* e *non cutting moves* relacionadas à trajetória paralela ao contorno, respectivamente. Em *cutting parameters* são estabelecidos todos os parâmetros que dizem respeito aos movimentos onde há remoção de material, como a direção de corte, em que ordem o corte deve ser feito (nível ou região primeiro), entre vários outros, como pode ser observado na Figura B.7a. As mesmas definições são feitas para ambas as ferramentas nesta seção. As definições apresentadas na Figura B.7b são estabelecidas para a ferramenta de 40 mm de diâmetro. Como mencionado

anteriormente, nesta seção são definidos os parâmetros utilizados nos movimentos onde não há remoção de cavaco e na entrada da ferramenta na peça. Vários pontos devem ser definidos nessa seção como pode ser observado na imagem, porém um dos mais importantes é a entrada da ferramenta na peça. No caso da trajetória paralela ao contorno a entrada selecionada foi em rampa com um ângulo de $0,8^\circ$.

Figura B. 7 - Definições da trajetória paralela ao contorno: (a) movimentos com remoção de material, e (b) movimentos sem remoção de material para a fresa de 40 mm



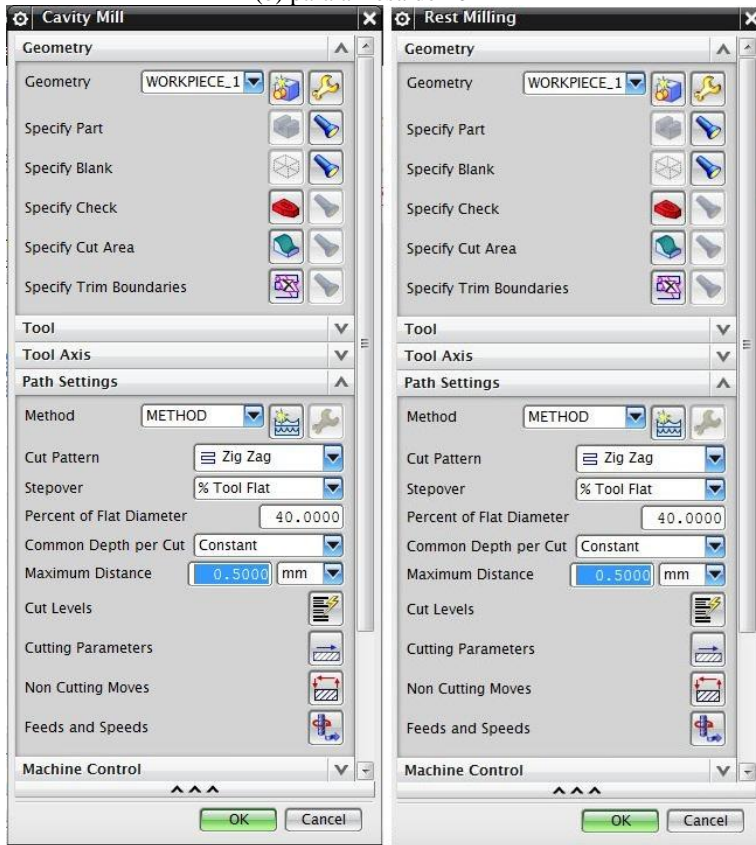
Fonte: Elaboração própria

Trajetória ziguezague

Os aspectos envolvidos na geração das trajetórias ziguezague das ferramentas de 40 e 20 mm são apresentados na Figura B.8a e B.8b, respectivamente. Os parâmetros da seção *feeds and speeds* foram apresentados na Figura B.4, enquanto os parâmetros da seção *non cutting*

moves para a ferramenta de 20 mm foram apresentados na Figura B.5. Para a ferramenta de 40 mm foram utilizados os mesmos parâmetros na seção *non cutting moves* da trajetória paralela ao contorno, ou seja, a entrada da ferramenta na peça foi em rampa com ângulo de $0,8^\circ$, entre outros aspectos.

Figura B. 8 – Definições da trajetória ziguezague: (a) para a fresa de 40 mm e (b) para a fresa de 20 mm



(a)

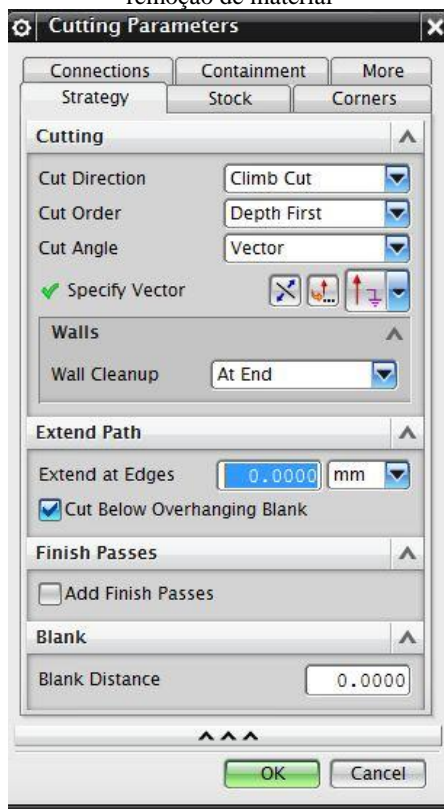
(b)

Fonte: Elaboração própria

As definições para os movimentos com remoção de material são o que diferem esta seção para as trajetórias paralela ao contorno e ziguezague pois, no caso da segunda trajetória, além de definir onde a remoção de material deve iniciar deve-se definir em que direção a ferramenta

deverá seguir. As definições desta seção são comuns a ambas as ferramentas utilizadas e apresentadas na Figura B.9.

Figura B. 9 - Definições da trajetória zigzague para os movimentos com remoção de material

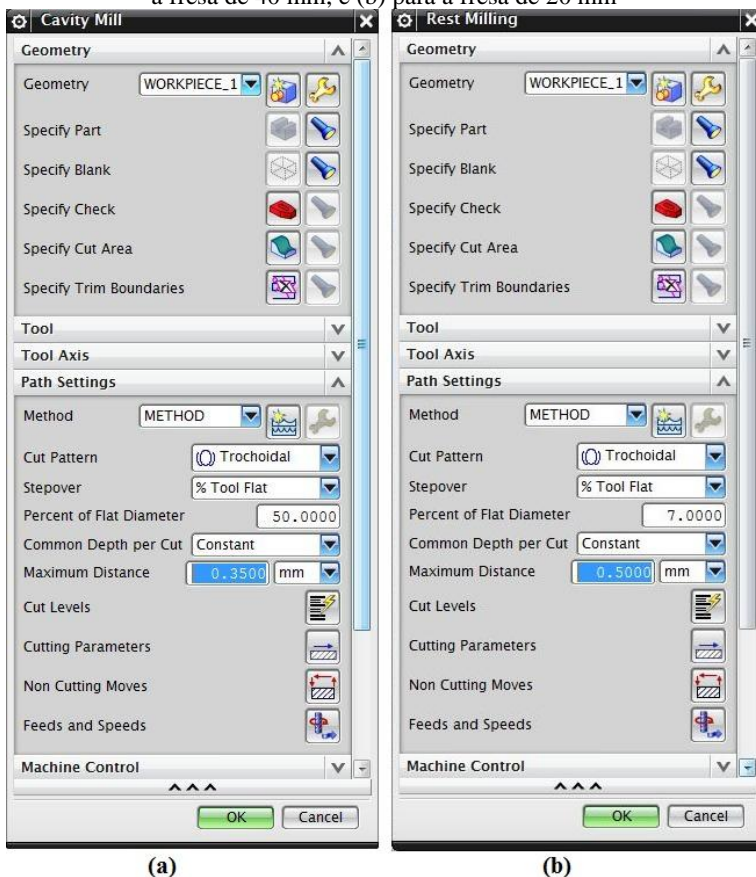


Fonte: Elaboração própria

Trajetória paralela ao contorno e trocoidal

Finalmente, são apresentados os aspectos envolvidos na geração das trajetórias paralela ao contorno e trocoidal das ferramentas de 40 e 20 mm, que podem ser observados Figura B.10a e B.10b respectivamente. Para esta trajetória, as únicas seções que possuem definições em comum com as trajetórias anteriores é a *feeds and speeds* e a *non cutting moves* para a ferramenta de 20 mm, apresentadas nas Figuras B.4 e B.5, respectivamente. As demais seções são apresentadas a seguir.

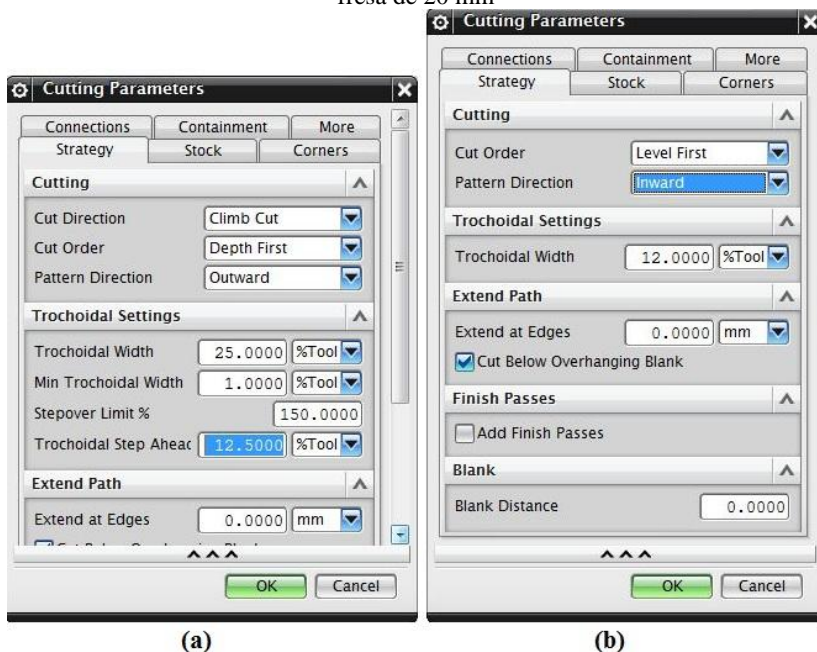
Figura B. 10 – Definições da trajetória paralela ao contorno e trocoidal: (a) para a fresa de 40 mm, e (b) para a fresa de 20 mm



Fonte: Elaboração própria

As principais diferenças para as definições dos movimentos onde há remoção de material entre esta trajetória e as demais é a necessidade de definir o tamanho da trocoide. Estas dimensões são especificadas em termos de porcentagem do diâmetro da ferramenta, como pode ser observado na Figura B.11.

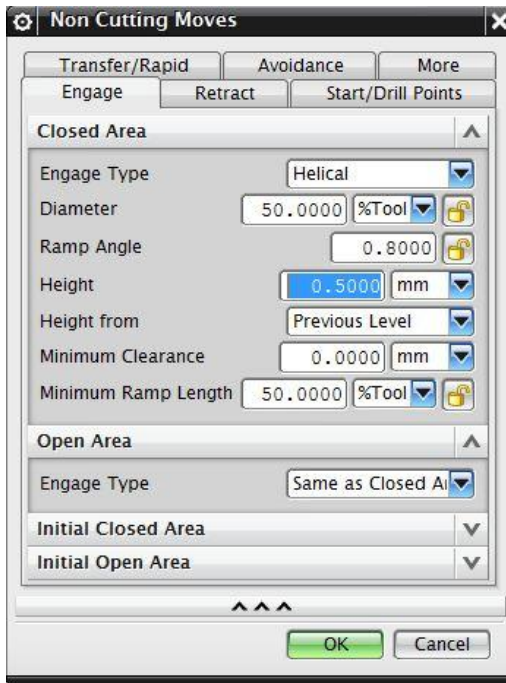
Figura B. 11 - Definições da trajetória paralela ao contorno e trocoidal para os movimentos com remoção de material: (a) para a fresa de 40 mm, e (b) para a fresa de 20 mm



Fonte: Elaboração própria

Finalmente, são estabelecidos os parâmetros dos movimentos onde não há remoção de material para a ferramenta de 40 mm, sendo a entrada da ferramenta na peça a principal definição desta seção. Neste caso a entrada da ferramenta na peça foi helicoidal com um ângulo de rampa de $0,8^\circ$. Além disso, o movimento helicoidal foi realizado com um diâmetro de 20 mm. As demais definições envolvendo estes movimentos são apresentadas na Figura B.12.

Figura B. 12 - Definições para a trajetória paralela ao contorno e trocoidal dos movimentos sem remoção de material para a fresa de 40 mm



Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE C - Desgaste dos Insertos

Os insertos foram analisados utilizando-se um estereoscópio da marca ZEISS, modelo STEMI SV8. A seguir são apresentados os desgastes dos insertos utilizados nas fresas de 40 e de 20 mm verificados após o término da usinagem (10 ciclos completados). As imagens aproximadas são apresentadas com uma escala de 0,5 mm.

Insertos da ferramenta de 40 mm

Devido as condições de usinagem empregadas, as pastilhas utilizadas no fresamento das cavidades não mostrou um desgaste significativo, não permitindo uma análise conclusiva sobre os mecanismos e desgastes ocorridos.

Nenhum dos insertos utilizados na fresa com 40 mm de diâmetro apresentou desgaste significativo no flanco e na face da ferramenta, em nenhuma trajetória, não sendo identificados os mecanismos de desgaste comuns no processo de fresamento, citados na literatura.

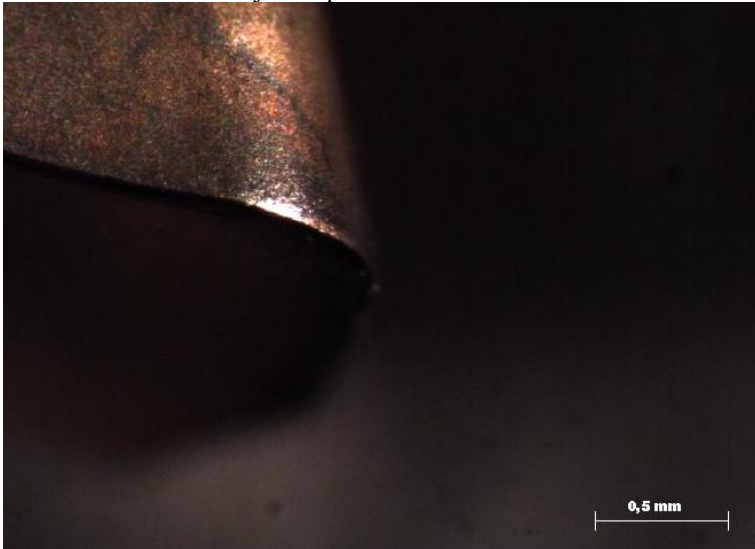
Uma pequena marca de desgaste é verificada no flanco e observa-se também uma mudança na coloração do revestimento de alguns insertos, decorrente da temperatura atingida durante o processo.

Nas Figuras C.1, C.2 e C.3 são apresentadas as marcas de desgaste de flanco verificadas nas pastilhas para as trajetórias paralela ao contorno após 14 minutos de usinagem, ziguezague após 22 minutos de usinagem, e combinada trocoidal e paralela ao contorno após 40 minutos de usinagem.

Apesar de ser um desgaste pequeno em um modo geral, o inserto utilizado na trajetória paralela ao contorno apresentou um desgaste maior do que o desgaste dos outros dois insertos. Além disso, as marcas causadas pelas temperaturas elevadas do processo são muito mais evidentes neste inserto.

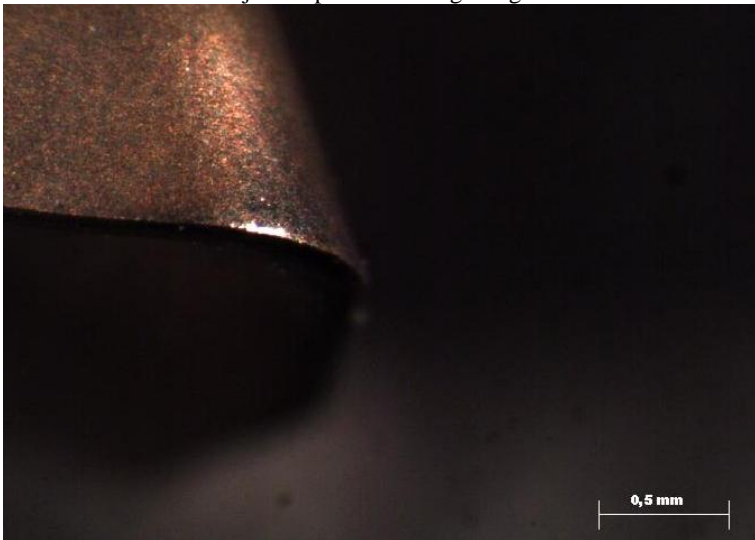
O inserto utilizado com a trajetória ziguezague apresentou um desgaste muito pequeno, representando apenas a remoção do revestimento em uma pequena área do gume. Apesar do tempo do processo ser superior para a trajetória ziguezague do que para a trajetória paralela ao contorno são observados menos marcas na ferramenta que representem uma resposta à elevação da temperatura durante o corte. Isso acontece devido ao fato de não haver imersão da ferramenta na peça durante o fresamento com a trajetória ziguezague, a não ser durante a entrada em rampa da ferramenta peça, que é comum às duas trajetórias citadas.

Figura C. 1 - Desgaste dos insertos utilizados na fresa de 40 mm realizando a trajetória paralela ao contorno



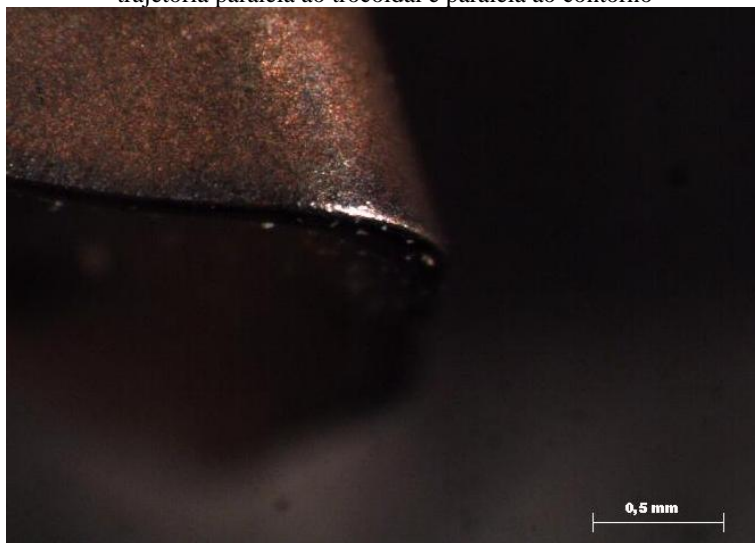
Fonte: Elaboração própria

Figura C. 2 - Desgaste dos insertos utilizados na fresa de 40 mm realizando a trajetória paralela ao ziguezague



Fonte: Elaboração própria

Figura C. 3 - Desgaste dos insertos utilizados na fresa de 40 mm realizando a trajetória paralela ao trocoidal e paralela ao contorno



Fonte: Elaboração própria

Assim como na trajetória ziguezague, a imersão da ferramenta na peça durante a trajetória trocoidal e paralela ao contorno acontece somente no momento da entrada no material, que durante a última trajetória foi feita em hélice. No caso da trajetória combinada trocoidal e paralela ao contorno, o desgaste foi menor do que o da trajetória paralela ao contorno, porém levemente superior ao apresentado pela trajetória ziguezague, especialmente em relação às marcas de temperatura. Existem duas justificativas para esta ocorrência: a entrada em hélice da ferramenta na peça, que caracteriza um aumento no tempo de contato entre a peça e a ferramenta quando comparada com a entrada em rampa, e a diminuição do tamanho da trocoide para a usinagem dos cantos da cavidade, que também aumenta o tempo de contato da ferramenta com a peça.

Insertos da ferramenta de 20 mm

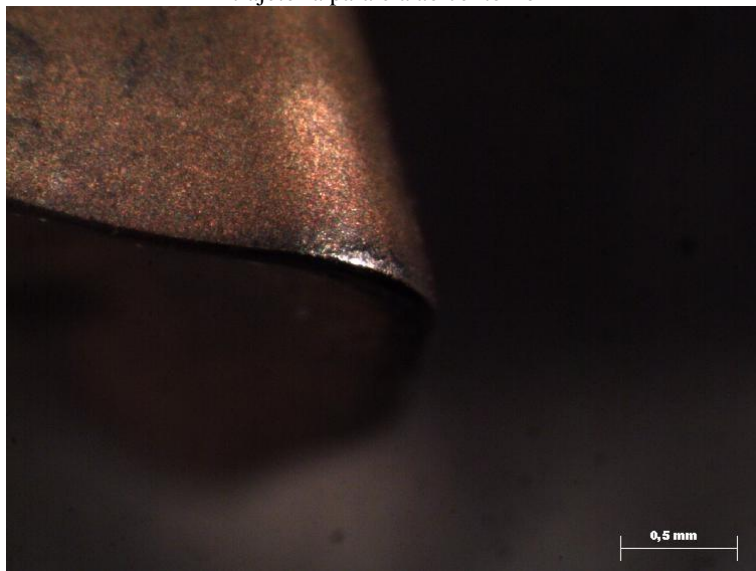
Os insertos utilizados na fresa com 20 mm de diâmetro, assim como os apresentados anteriormente, não sofreram desgastes significados em seus gumes.

As remoções de revestimento são apresentados nas Figuras C.4, C.5 e C.6 para os inserts utilizados nas trajetórias paralela ao contorno após 11 minutos de usinagem, zigzague após 23 minutos de usinagem e combinada trocoidal e paralela ao contorno após 57 minutos de usinagem.

Do mesmo modo que o inserto da ferramenta de 40 mm, o inserto utilizado na trajetória paralela ao contorno para a ferramenta de 20 mm apresentou a maior remoção de revestimento entre os três inserts analisados. Quando comparado com o inserto utilizado na ferramenta maior para usinar o mesmo tipo de trajetória, observa-se que as marcas de temperatura são bem menos evidentes. Ambos os inserts são imersos no material durante o corte, porém, no caso da ferramenta de 20 mm a área a ser usinada é expressivamente menor, o que pode justificar as temperaturas superiores alcançadas na usinagem com a maior ferramenta.

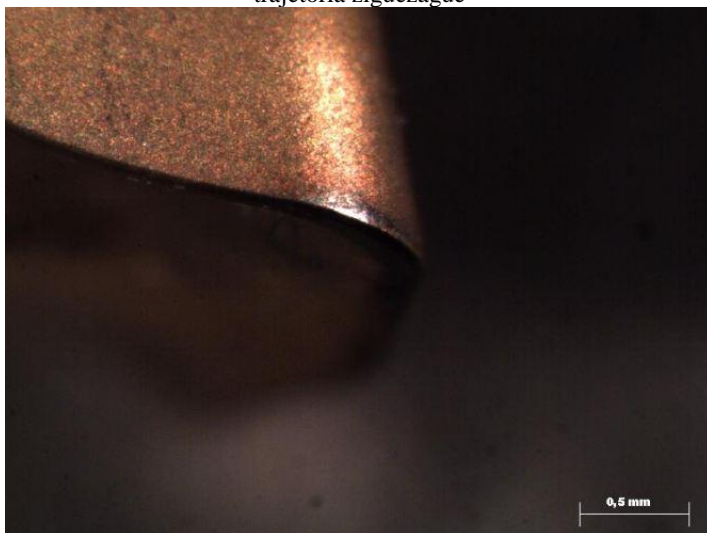
O contrário é observado nos inserts utilizadas para a trajetória zigzague, a remoção do revestimento e as marcas de temperatura do inserto da ferramenta de 20 mm são mais evidentes do que as apresentadas pelo inserto inserido na ferramenta maior.

Figura C. 4 - Desgaste dos inserts utilizados na fresa de 20 mm realizando a trajetória paralela ao contorno



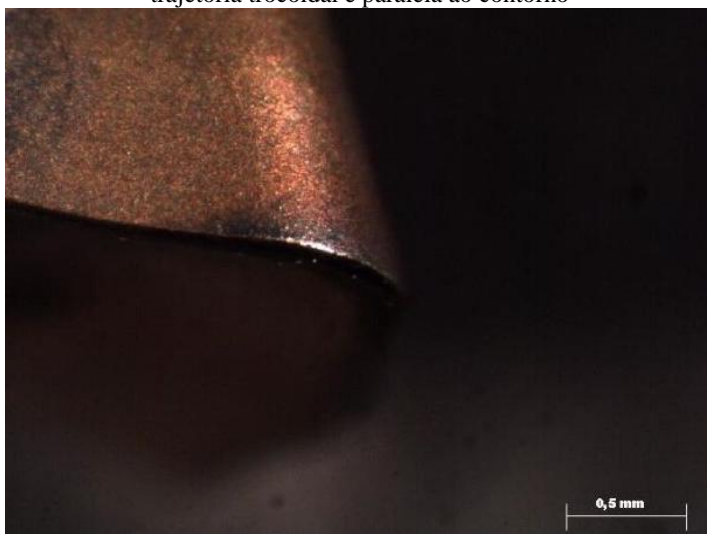
Fonte: Elaboração própria

Figura C. 5 - Desgaste dos insertos utilizados na fresa de 20 mm realizando a trajetória zigzag



Fonte: Elaboração própria

Figura C. 6 – Desgaste dos insertos utilizados na fresa de 20 mm realizando a trajetória trocoidal e paralela ao contorno



Fonte: Elaboração própria

Finalmente, o inserto utilizado na ferramenta menor para usinar a trajetória combinada trocoidal e paralela ao contorno foi o que apresentou o menor desgaste entre todos os insertos analisados, tanto em relação à remoção do revestimento quanto em relação às marcas de temperatura. Para esta ferramenta não foi necessária entrada em hélice da ferramenta na peça, o que pode ter contribuído para a redução do seu desgaste. Além disso, o tamanho da trocoide permanece constante durante todo o corte.