

David Manuel Ochoa González

**MÉTODO DE GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS TROCIDAIS  
E ESPIRAIS COMBINADAS PARA O FRESAMENTO DE  
DESBASTE DE CAVIDADES 2,5D COM MÚLTIPLAS  
FERRAMENTAS**

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. Dr. João Carlos  
Espíndola Ferreira, Ph.D.

Florianópolis  
2013

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

sertacaoDavidOchoa-45-161.doc

González, David Manuel Ochoa

Método de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para o fresamento de desbaste de cavidades 2,5D com múltiplas ferramentas / David Manuel Ochoa González ; orientador, João Carlos Espíndola Ferreira - Florianópolis, SC, 2013.

110 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Fresamento. 3. Geração de trajetória. 4. Trajetórias trocoidais. 5. Eixo médio. I. Ferreira, João Carlos Espíndola . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

David Manuel Ochoa González

**MÉTODO DE GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS TROCOIDAI  
E ESPIRAIS COMBINADAS PARA O FRESAMENTO DE  
DESBASTE DE CAVIDADES 2,5D COM MÚLTIPLAS  
FERRAMENTAS**

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, 8 de março de 2013.

---

Prof. Júlio César Passos, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.  
Orientador

---

Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.  
Sociedade Educacional de Santa Catarina – Joinville

---

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Neri Volpato, Ph.D.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Gabina, pelo apoio e as experiências compartilhadas durante estes anos, pela sua dedicação e amor.

Aos meus pais pelo apoio constante e incondicional.

Ao professor João Carlos Espíndola Ferreira, pelo seu profissionalismo como orientador, pela sua disposição e pelo trabalho conjunto.

Ao Anderson Schelbauer pela ajuda no laboratório e pelas nossas conversas durante os testes de usinagem.

Às todas as pessoas que laboram no Departamento de Engenharia Mecânica e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela disponibilidade e pelo trabalho e ao CNPq pelo suporte financeiro.



## RESUMO

Para o fresamento de cavidades as estratégias de geração de trajetórias mais utilizadas são a paralela ao contorno e a paralela a uma direção, apesar de que as trajetórias geradas com essas estratégias normalmente gerem segmentos com um elevado ângulo de incidência da ferramenta em cantos e em regiões estreitas. A utilização das trajetórias trocoidais tem sido proposta recentemente para evitar ou minimizar esses segmentos que são considerados críticos. Nesta dissertação é apresentado um método para gerar trajetórias trocoidais de ferramentas para cavidades de 2,5D utilizando a transformada do eixo médio, a qual foi implementada na linguagem *Octave*, e a sua avaliação foi efetuada em provas reais de fresamento. O método proposto, denominado OC2PATH, parte de representações poligonais da cavidade, incluindo ilhas, e o diagrama do eixo médio é calculado como uma série de pontos. Esses pontos são ordenados e agrupados formando linhas. Os pontos são utilizados para gerar uma trajetória trocoidal gerando círculos com centro sobre esses pontos. Com o intuito de evitar que a ferramenta percorra duas vezes a mesma área é utilizada uma simulação baseada em pixel aplicada ao tempo de geração da trajetória. Também é apresentado um método que utiliza as trajetórias geradas e as informações de uma família de ferramentas para obter a sequência de ferramentas que permite minimizar os tempos de fresamento. Para avaliar esta proposta, foi usinada uma cavidade complexa em aço P-20 utilizando tanto com a implementação em *Octave* do método quanto o programa computacional comercial *NX* (da *Siemens*) para gerar as trajetórias. São apresentadas análises detalhadas dos tempos para cada programa, comparando-se as demandas de potência de usinagem ao longo do tempo. O método apresentado gera as trajetórias para a usinagem de cavidades, e de fato há uma limitação da profundidade radial de corte ao longo da trajetória, porém as trajetórias trocoidais normalmente têm um comprimento maior (de 1,5 a 2,5 vezes) do que as trajetórias paralelas ao contorno e aquelas que utilizam estratégias combinadas (como a trajetória gerada pelo software comercial usado na comparação).

**Palavras-chave:** Fresamento, Geração de trajetória, Trajetórias trocoidais, Eixo médio, Montanha de Voronoi.





## ABSTRACT

The two most used tool-path generation strategies for milling a pocket are direction-parallel and contour-parallel, although the tool paths obtained with these strategies usually create regions with a high cutter sweep angle in corners and narrow slots which can be problematic to machine. The utilization of a trochoidal tool path has been proposed recently in order to avoid the occurrence of these regions. In this dissertation, a method for generating trochoidal tool paths for 2½D pocket milling using a medial axis transform is proposed, which is implemented in the Octave computer language, and an evaluation of the resulting tool path in real milling tests is presented. In order to achieve this goal, first the pocket and islands are represented as polygons, and the medial axis transform is calculated as a series of points. The points are then sorted and grouped, generating lines by an algorithm. After that, they are used as centers of circles in order to generate the trochoidal tool path. The tool path length is generated using a pixel-based simulation limiting air cuts. A method for minimize the machining time by cutting tool selection and area segmentation using the generated tool-paths is also presented. The presented method was evaluated through machining a pocket in a P20 tool steel, using tool paths generated with the proposed method (referred to as OC2PATH) and the commercial software NX (from Siemens). Detailed analysis for each tool and tool path is carried out, including graphs and images of cutting power requirements. The proposed method generates the toolpaths and NC code, and in fact there is a limitation in the radial depth of cut along the toolpath. However, the obtained toolpaths are lengthier (usually between 1.5 and 2.5 times) than the contour-parallel toolpaths and combined tool-paths (as those obtained with the commercial software used as a means of comparison).

**Keywords:** Milling, Tool path generation, Trochoidal tool path, Medial axis, Voronoi Mountain.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fresamento concordante. Fonte: Sandvik, 2010 - adaptado. ....	27
Figura 2.2. Fresamento discordante. Fonte: Sandvik, 2010 - adaptado. ....	27
Figura 2.3. Danos mais comuns nas ferramentas. Lascamento (a), craterização (b), desgaste de flanco (c). Fonte: Sandvik, 2010. ....	28
Figura 2.4. Tipos de trajetórias. Ziguezague (a) e (b), paralelas ao contorno (c). Fonte: Chen 2011.....	31
Figura 2.5. Variação do ângulo de incidência do material ( $\gamma$ ). Fonte: Boogerts, Kals e van Houten (1996). – adaptado.....	33
Figura 2.6. Tipos de corte que acontecem no fresamento frontal. Fonte: Hinduja, Ma e Barrow (1995) - adaptado.....	33
Figura 2.7. Trajetória trocoidal e seus parâmetros. Fonte: Rauch, Duc e Hascoet (2009) - adaptado.....	35
Figura 2.8. Diagramas de Voronoi. Fonte: Held (2001) - adaptado.....	35
Figura 3.1. Extração de um polígono de uma cavidade simples. Fonte: elaboração própria.....	37
Figura 3.2. Vértices dos quadrículos localizados dentro do polígono ("x"). Fonte: elaboração própria.....	38
Figura 3.3. Distância mínima do ponto P ao polígono que representa a cavidade. Fonte: elaboração própria.....	38
Figura 3.4. Pontos do diagrama do eixo médio para uma dada cavidade. Fonte: elaboração própria.....	39
Figura 3.5. Centros dos círculos da trajetória trocoidal. Fonte: elaboração própria.....	39
Figura 3.6. Polígonos diferentes com o mesmo diagrama do eixo médio. Fonte: elaboração própria.....	41
Figura 3.7. Representação isométrica da Montanha de Voronoi obtida do polígono da Figura 3.1(b). Fonte: elaboração própria.....	42
Figura 3.8. Cálculo da distância para um segmento: (a) distância para o ponto P1, (b) distância para a linha reta, (c) distância para o segmento P1-P2. Fonte: elaboração própria.....	44
Figura 3.9. Cálculo da montanha de Voronoi. Cada letra (a)-(f) apresenta a inclusão de uma nova linha do polígono. Fonte: elaboração própria.....	45
Figura 3.10. Valores do laplaciano na montanha de Voronoi. Fonte: elaboração própria.....	46
Figura 3.11. Exemplo dos valores do gradiente em uma montanha de Voronoi. Fonte: elaboração própria.....	47

Figura 3.12. Gráfico do raio do círculo inscrito e a cavidade associada. Fonte: elaboração própria.....	49
Figura 3.13. Raio mínimo considerado para a geração de trajetórias trocoidais neste trabalho. Fonte: elaboração própria.....	49
Figura 3.14. Divisão do diagrama do eixo médio segundo os raios das ferramentas (nesta figura são consideradas três ferramentas). Fonte: elaboração própria.....	51
Figura 3.15. Fluxograma do algoritmo usado para gerar a trajetória trocoidal – parte 1. Fonte: elaboração própria.....	52
Figura 3.16. Fluxograma do algoritmo usado para gerar a trajetória trocoidal - parte 2. Fonte: elaboração própria. ....	53
Figura 3.17. Avaliação da presença ou não de material, aplicando-se um método baseado em pixels. Fonte: elaboração própria. ....	54
Figura 3.18. Criação de um arco de círculo que será usado na trajetória da ferramenta. Fonte: elaboração própria.....	55
Figura 3.19. Trajetórias trocoidal e paralela ao contorno de uma cavidade. Fonte: elaboração própria. ....	56
Figura 3.20. Trajetórias trocoidal e paralela ao contorno de uma cavidade. Fonte: elaboração própria. ....	56
Figura 3.21. Trajetórias trocoidal e paralela ao contorno de uma cavidade. Fonte: elaboração própria. ....	57
Figura 3.22. Tempos de usinagem de uma cavidade para diferentes combinações de ferramentas. Fonte: elaboração própria. ....	60
Figura 3.23. Sequência de trajetórias para múltiplas ferramentas geradas para uma cavidade com forma de mão. (a) Ferramenta com $d=30\text{mm}$ , (b) $d=14\text{mm}$ , (c) $=10\text{ mm}$ . Fonte: elaboração própria.....	61
Figura 3.24. Sequência de trajetórias para múltiplas ferramentas geradas para uma cavidade com forma humana. (a) Ferramenta com $d=25\text{mm}$ , (b) $d=16\text{mm}$ , (c) $=6\text{mm}$ . Fonte: elaboração própria.....	62
Figura 3.25. Trajetórias geradas para múltiplas ferramentas para a usinagem de uma cavidade usada na parte experimental deste trabalho. (a) Ferramenta com $d=40\text{ mm}$ , (b) $d=20\text{ mm}$ , (c) $=10\text{ mm}$ . Fonte: elaboração própria.....	63
Figura 4.1. Cavidade utilizada nos testes de usinagem. Fonte: elaboração própria.....	65
Figura 5.1. Fotografia das cavidades usinadas. (OC2PATH: esquerda, NX: direita). Fonte: elaboração própria. ....	71
Figura 5.2. Divisão das áreas segundo o diâmetro da ferramenta utilizado para usiná-las. Fonte: elaboração própria.....	72
Figura 5.3. Detalhamento dos tempos de usinagem com a ferramenta de diâmetro $40\text{ mm}$ . Fonte: elaboração Própria. ....	74

Figura 5.4. Detalhamento dos tempos de usinagem com a ferramenta de diâmetro 20 mm. Fonte: elaboração Própria. ....	75
Figura 5.5. Erro na trajetória gerada com o software NX. Fonte: elaboração própria. ....	76
Figura 5.6. Detalhamento dos tempos de usinagem da ferramenta de diâmetro 10 mm. Fonte: elaboração Própria. ....	77
Figura 5.7. Volume não usinado pelo código gerado com o software OC2PATH. ....	77
Figura 5.8. Detalhamento dos tempos de usinagem de todas as ferramentas. Fonte: elaboração própria. ....	78
Figura 5.9. Detalhamento dos tempos de usinagem de todas as ferramentas, utilizando um avanço de 10.000 mm/min para o comando G00. Fonte: elaboração própria. ....	79
Figura 5.10. Potência ao longo do tempo de usinagem da ferramenta de diâmetro 40 mm, com a trajetória gerada pelo software OC2PATH. Fonte: elaboração própria. ....	81
Figura 5.11. Potência ao longo do tempo de usinagem da ferramenta de diâmetro 40 mm, com a trajetória gerada pelo software NX. Fonte: elaboração própria. ....	81
Figura 5.12. Potência ao longo do tempo de usinagem da ferramenta de diâmetro 20 mm, com a trajetória gerada pelo software OC2PATH. Fonte: elaboração própria. ....	82
Figura 5.13. Potência ao longo do tempo de usinagem da ferramenta de diâmetro 20 mm, com a trajetória gerada pelo software NX. Fonte: elaboração própria. ....	83
Figura C.1. Posicionamento da câmara de vídeo. Fonte: elaboração própria. ....	102
Figura C.2. Seleção da área de interesse no CNC. Fonte: elaboração própria. ....	103
Figura C.3. Diferença calculada entre as imagens da área de interesse. Fonte: elaboração própria. ....	104
Figura E.1. Fotografias do flanco principal do inserto usado na ferramenta de diâmetro 40 mm. Fonte: elaboração própria. ....	106
Figura E.2. Fotografias da face do inserto usado na ferramenta de diâmetro 40 mm. Fonte: elaboração própria. ....	107
Figura E.3. Fotografias do flanco principal do inserto usado na ferramenta de diâmetro 20 mm. Fonte: elaboração própria. ....	108
Figura E.4. Fotografias da face do inserto usado na ferramenta de diâmetro 20 mm. Fonte: elaboração própria. ....	108
Figura E.5. Fotografias do flanco principal do inserto usado na ferramenta de diâmetro 10 mm. Fonte: elaboração própria. ....	109

Figura E.6. Fotografias da face do inserto usado na ferramenta de diâmetro 10 mm. Fonte: elaboração própria. .... 110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros de operação utilizados para a família das ferramentas MEC da fabricante Kyocera. Fonte: elaboração própria. ..	59
Tabela 4.1. Comparação dos simuladores CNC utilizados neste trabalho. Fonte: elaboração própria.....	66
Tabela 4.2. Especificações da Fresadora MVC-955. Fonte: elaboração própria.....	67
Tabela 4.3. Parâmetros de corte utilizados. Fonte: elaboração própria.	68
Tabela 4.4. Parâmetros de operação da máquina calculados. Fonte: elaboração própria.....	69
Tabela C.1. Parâmetros do comando avconv. Fonte: elaboração própria.....	102
Tabela C.2. Parâmetros do comando convert. Fonte: elaboração própria.....	103
Tabela D.1. Exemplo do código gerado.....	105





## LISTA DE SÍMBOLOS

$x, y, z$	Coordenadas utilizadas na fresadora (mm)
$V_c$	Velocidade de corte (m/min)
$D$	Diâmetro da ferramenta (mm)
$n$	Velocidade de rotação do fuso (RPM)
$f_z$	Avanço por dente (mm)
$Z_c$	Número de gumes na ferramenta
$V_f$	Velocidade de avanço (mm/min)
$a_p$	Profundidade axial de corte (mm)
$a_e$	Profundidade radial de corte (mm)
$Q$	Taxa de remoção de material (mm <sup>3</sup> /min)
$k_c$	Pressão específica de corte (N·min/mm <sup>3</sup> )
$P_c$	Potência de corte (Watt)
$\gamma$	Ângulo de incidência (graus)
$\alpha^\circ$	Ângulo máximo de rampa (graus)
$r$	Distância mínima de um ponto ao polígono da cavidade
$i$	Variável de controle usada no código
$m$	Número de ferramentas disponíveis



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	21
1.1 OBJETIVO GERAL .....	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	25
2.1. REFERENCIAL TEÓRICO DE FRESAMENTO.....	25
2.1.1 Usinagem com ferramenta de geometria definida.....	25
2.1.2 Fresamento.....	25
2.1.3 Parâmetros de corte.....	25
2.1.4 Potência de corte.....	28
2.1.5 Vida da ferramenta de corte.....	28
2.1.6 Usinagem de cavidades.....	29
2.1.7 Seleção das ferramentas para usinagem de cavidades .....	29
2.2. REFERENCIAL TEÓRICO DAS TRAJETÓRIAS DE FRESAMENTO DE CAVIDADES.....	30
2.2.1 Trajetórias tipo zigzague.....	30
2.2.2 Trajetórias tipo paralelas ao contorno.....	31
2.2.3 Métodos de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas .....	34
2.2.4 Métodos de geração para outras trajetórias.....	35
2.2.5 Linguagem para programação de trajetórias: Código G .....	36
3. MÉTODO PROPOSTO PARA A GERAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS .....	37
3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	37
3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	40
3.2.1 Diagrama do eixo médio.....	40
3.2.2 Análise do diagrama do eixo médio: segmentação da área segundo o tamanho da ferramenta .....	48
3.2.3 Geração da trajetória trocoidal.....	50
3.2.4 Exemplos de trajetórias obtidas com o método.....	55
3.2.5 Otimização do tempo de operação mediante a seleção das ferramentas.....	57
3.2.6 Resultados obtidos com o método. ....	60
4. MATERIAIS E MÉTODOS PARA OS TESTES DE FRESAMENTO .....	65
4.1 GERAÇÃO DOS PROGRAMAS DE COMANDO NUMÉRICO .....	65
4.2 AVALIAÇÃO USANDO SIMULADORES .....	65
4.3 ESPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA FERRAMENTA UTILIZADA .....	67

4.4	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL USINADO .....	68
4.5	PARÂMETROS DE USINAGEM UTILIZADOS NOS TESTES .....	68
5.	RESULTADOS DOS TESTES .....	71
5.1	DETALHAMENTO DOS TEMPOS .....	71
5.2	ANÁLISE DA DEMANDA DE POTÊNCIA .....	79
5.4	CONCLUSÕES DOS TESTES DE USINAGEM .....	84
6.	CONCLUSÕES .....	85
6.1	RECOMENDAÇÕES REFERENTES AO MÉTODO DE GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS .....	86
6.2	RECOMENDAÇÕES REFERENTES AO FRESAMENTO TROCICAL .....	86
6.3	RECOMENDAÇÕES REFERENTES À AVALIAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS .....	86
	REFERÊNCIAS .....	89
	APÊNDICE A - Vetorização na linguagem Octave .....	93
	APÊNDICE B - Geração de trajetórias com o UGS NX® .....	94
	Projeto da cavidade .....	94
	Geração das trajetórias .....	94
	Parâmetros comuns da trajetória trocoidal .....	96
	Ferramenta de diâmetro 40 mm .....	96
	Ferramenta de diâmetro 20 mm .....	98
	Ferramenta de diâmetro 10 mm .....	98
	Pós-processamento da trajetória .....	100
	APÊNDICE C - Captura das informações da tela do CNC usando uma câmara de vídeo .....	101
	Justificativa .....	101
	Gravação do vídeo .....	101
	Extração das imagens do vídeo .....	101
	Seleção da área de interesse .....	102
	Automatização da leitura dos dados .....	103
	APÊNDICE D – Exemplo de código gerado .....	105
	APÊNDICE E - Desgaste da ferramenta .....	106
	Ferramenta de 40 mm .....	106
	Ferramenta de 20 mm .....	107
	Ferramenta de 10 mm .....	109

## 1. INTRODUÇÃO

Uma grande quantidade de produtos precisa de forma direta ou indireta de processos de usinagem. Dentre eles, tem-se a indústria de produção de plásticos, a qual utiliza moldes metálicos obtidos mediante a usinagem de cavidades de formas complexas. Embora existam diferentes métodos para usinar cavidades nesses materiais, o processo de fresamento é amplamente utilizado. Este processo é dividido em operações com uma grande taxa de remoção de material (desbaste) e operações que visam produzir uma superfície com bom acabamento.

Estima-se que as operações de desbaste correspondem a 50% a 60% do tempo usado para o fresamento de cavidades (CHEN; FU, 2011, p. 651), e que a forma mais eficiente para realizá-las é através de fresamento 2,5D (HATNA; GRIEVE; BROOMHEAD, 1998, p. 310). O grande número de pesquisas buscando melhorias nos processos de fresamento de cavidades mostra como são importantes as melhorias nesta área.

Para usinar uma cavidade é necessário obter as especificações do projeto da peça, e efetuar-se o planejamento do processo. Embora não exista uma divisão universalmente aceita para o planejamento de um processo de usinagem as atividades que compõem essas etapas têm sido estudadas em várias pesquisas. Uma dessas etapas consiste no reconhecimento das *features* na peça (isto é, a identificação do volume a ser removido da matéria-prima para se chegar à peça acabada), e posteriormente efetua-se a seleção das máquinas e dispositivos de fixação necessários para a fabricação. Em seguida deve-se decidir quais ferramentas serão utilizadas, quais serão as trajetórias das ferramentas e os parâmetros de usinagem.

Neste contexto, este trabalho apresenta um método para a geração de trajetórias que combina estratégias espirais e trocoidais para fresamento. A geração de trajetórias é um processo difícil uma vez que erros são cometidos facilmente, portanto utiliza-se via de regra softwares para a geração das trajetórias (HATNA; GRIEVE; BROOMHEAD, 1998, NARAYANASWAMI; CHOI, 2001). Similarmente a trabalhos anteriores, o método proposto baseia-se no cálculo do diagrama do eixo médio. Porém, enquanto tradicionalmente tal diagrama é obtido mediante algoritmos baseados na análise das bisettrizes (RAMAMURTHY; FAROUKI, 1999, HELD, 2001), neste trabalho obtém-se uma série de pontos que pertencem ao diagrama do eixo médio, utilizando-se uma divisão em quadrículos da área que representa a cavidade.

O método apresentado neste trabalho foi usado no desenvolvimento de um software, chamado de OC2PATH, que permite gerar trajetórias para as ferramentas e os respectivos arquivos para serem utilizados em um centro de usinagem CNC. As trajetórias geradas utilizam entradas helicoidais para iniciar a usinagem em áreas fechadas e trajetórias espirais e trocoidais para usinar a cavidade desejada. O método proposto e sua implementação permitem utilizar cavidades de fundo plano de formas diversas, com o sem ilhas (protuberâncias). O software OC2PATH calcula os tempos de usinagem ao mesmo tempo em que as trajetórias são geradas. O trabalho de Elber, Cohen e Drake (2004) apresenta um método de geração de trajetórias similar, porém o método apresentado por eles não consegue gerar trajetórias em cavidades com ilhas.

Partindo de um conjunto de ferramentas e seus parâmetros de operação e utilizando as informações geradas pelo software OC2PATH, este trabalho apresenta também um método para obter a sequência de ferramentas que permite minimizar os tempos de usinagem.

Visando verificar as vantagens do método proposto, as trajetórias geradas foram testadas na usinagem de uma cavidade. Nessa avaliação foi feita uma comparação entre a trajetória gerada com o método apresentado e uma trajetória gerada por um software comercial. As trajetórias são comparadas usando-se uma análise dos tempos e gráficos da potência elétrica do motor principal.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um método de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para o fresamento de cavidades 2,5D.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver e programar na linguagem de programação Octave um método computacional de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para o fresamento de desbaste de cavidades 2,5D.
- Desenvolver um método para a seleção das fresas, de acordo com o seu diâmetro, visando minimizar o tempo de usinagem.
- Efetuar testes reais de usinagem de uma cavidade visando avaliar as trajetórias geradas mediante uma comparação com trajetórias geradas por um software comercial, em termos do tempo de

usinagem e da potência elétrica do motor principal da máquina CNC utilizada neste trabalho.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: primeiramente uma revisão bibliográfica referente ao fresamento de cavidades e os métodos de geração de trajetórias no Capítulo 2. Depois é apresentado o algoritmo para a geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para fresamento de cavidades 2,5D, enquanto o método para a seleção de uma combinação ótima de ferramentas de diferentes diâmetros é apresentada no Capítulo 3. Os testes de fresamento realizados visando avaliar as trajetórias obtidas são apresentados no Capítulo 4, e os seus resultados são mostrados no Capítulo 5. Finalmente as conclusões deste trabalho são apresentadas no Capítulo 6.





## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. REFERENCIAL TEÓRICO DE FRESAMENTO**

#### **2.1.1 Usinagem com ferramenta de geometria definida**

A definição dos processos de usinagem é normalmente referida à norma ISO 3002/82 (STEMMER, 1995). Nela define-se que processos de usinagem são processos de fabricação em que ocorre a remoção de um volume da peça, o qual é transformado em cavaco. Essa remoção ocorre quando a ferramenta percorre a matéria-prima com certa velocidade relativa, e consegue remover o material, que após a remoção não possui forma regular - o cavaco. Os processos de usinagem são divididos entre aqueles que utilizam ferramenta com geometria definida (p.ex. torneamento, fresamento) e aqueles com ferramenta com geometria não-definida (p.ex. retificação).

Os processos de geometria definida são diferenciados de acordo com os movimentos relativos entre a ferramenta e a peça. Neste trabalho será dada ênfase ao processo de geometria definida de fresamento, o qual é detalhado na próxima seção.

#### **2.1.2 Fresamento**

No processo de fresamento acontecem dois movimentos: o de corte ou principal (rotação da ferramenta, que é denominada fresa) e o de avanço (deslocamento que ocorre entre a fresa e a peça). Uma das características importantes no processo de fresamento é que os gumes têm contato intermitente com a peça, que o diferencia dos processos de torneamento e furação. Outra característica do fresamento é que o movimento de avanço pode ocorrer em qualquer direção, isto é, tanto na direção do eixo de rotação da ferramenta (eixo  $z$ ) quanto numa direção perpendicular a  $z$  (plano  $x,y$ ), ou em ângulo entre eles. Um processo de fresamento comumente utilizado é o fresamento 2,5D (HATNA; GRIEVE; BROOMHEAD, 1998, p. 310), que consiste em proporcionar que a fresa percorra uma trajetória 2D no plano  $x,y$  para diferentes níveis do eixo  $z$ .

#### **2.1.3 Parâmetros de corte**

Nesta seção são apresentados os principais parâmetros de corte relacionados ao fresamento.

A velocidade de corte ( $V_c$ ) é a velocidade com que o gume da ferramenta penetra na matéria-prima, associada com o diâmetro da ferramenta e a sua velocidade de rotação. A velocidade de corte é normalmente o parâmetro que mais afeta a vida da ferramenta,

influenciando o atrito e o calor gerado. No entanto, ela também está associada à rugosidade da superfície da peça. Por isso procura-se utilizar normalmente uma velocidade de corte relativamente baixa durante as operações de desbaste, para maximizar a vida da ferramenta, enquanto que para o acabamento busca-se utilizar uma alta velocidade de corte, de maneira a minimizar a rugosidade. Normalmente o fornecedor da ferramenta publica nos manuais um intervalo de velocidades de corte recomendadas, e utilizando essa informação e o diâmetro da ferramenta ( $D$ ) calcula-se a velocidade de rotação ( $n$ ) da ferramenta utilizando a Equação (1) (SANDVIK, 2010).

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

O avanço por dente ( $f_z$ ) é a distância que a ferramenta se desloca no tempo entre cada gume, e tem relação direta com o tamanho do cavaco e com a rugosidade da superfície. Usando esse valor, a velocidade de rotação do fuso ( $n$ ) e o número de dentes (ou gumes) da fresa ( $Z_c$ ), pode-se calcular usando-se a Equação (2) a velocidade de avanço ( $V_f$ ), que é a velocidade relativa do eixo da ferramenta com relação à peça (SANDVIK, 2010).

$$V_f = f_z \times n \times Z_c \dots \dots (2)$$

A profundidade axial de corte ( $a_p$ ) é a distância que, no sentido do eixo de giro da ferramenta, esta se desloca na direção da matéria-prima. Este parâmetro é limitado pela profundidade da cavidade, pela geometria e resistência da ferramenta e pela potência disponível para o processo.

A profundidade radial de corte ( $a_e$ ) é a distância que a ferramenta percorre o material no sentido do raio da ferramenta e perpendicular ao movimento de avanço.

A taxa de remoção de metal ( $Q$ ) é obtida pela combinação dos três parâmetros anteriores, segundo a Equação (3) (SANDVIK, 2010). Já que é uma relação da quantidade de material que é removido em uma unidade do tempo, essa taxa está diretamente relacionada ao tempo necessário para a usinagem.

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times V_f}{1000} \dots \dots (3)$$

Em termos do movimento relativo da ferramenta em relação à matéria-prima, as trajetórias de usinagem no fresamento são classificadas como concordante e discordante (ver Figura 2.1 e Figura 2.2). No movimento concordante a peça se move no mesmo sentido que

a ferramenta, enquanto no discordante a peça e a ferramenta se movem em sentidos opostos. No movimento concordante o contato inicial entre a ferramenta e a peça ocorre em um ponto onde a espessura do material é maior do que zero, impacto esse que pode causar vibração e queda na qualidade da superfície usinada (COSTA, 2003). Por outro lado, no movimento discordante o contato inicial entre a ferramenta e a peça ocorre com a espessura dos cavacos teoricamente igual a zero, produzindo antes do início do corte esforços compressivos sobre a superfície da peça, podendo produzir altos níveis de atrito e uma rápida degradação do gume.

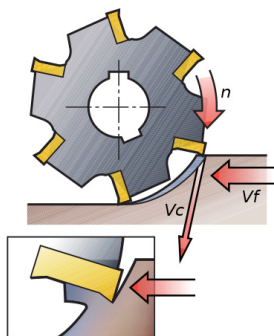


Figura 2.1. Fresamento concordante. Fonte: Sandvik, 2010 - adaptado.

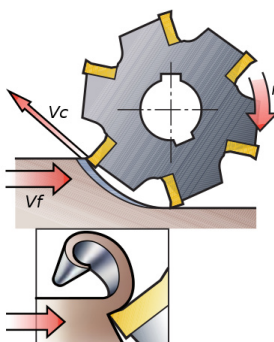


Figura 2.2. Fresamento discordante. Fonte: Sandvik, 2010 - adaptado.

Quando a profundidade radial de corte for maior do que o raio da ferramenta, ocorre uma combinação dos movimentos concordante e discordante.

### 2.1.4 Potência de corte

Segundo (STEMMER, 1995; SANDVIK 2010), se os parâmetros de corte estiverem na faixa dos parâmetros normalmente utilizados, estima-se a potência de corte utilizando a pressão específica de corte ( $k_c$ ). O valor da pressão específica de corte relaciona a pressão necessária por unidade de volume no processo de usinagem. Portanto, quando esse valor for multiplicado pela taxa de remoção de material, obtém-se o valor da potência, segundo a Equação (4) (SANDVIK, 2010).

$$P_c = \frac{a_p \times a_e \times V_f \times k_c}{60 \times 10^6} = \frac{Q \times k_c}{60 \times 1000} \dots\dots (4)$$

### 2.1.5 Vida da ferramenta de corte

Os grandes esforços mecânicos e as altas temperaturas limitam o tempo de vida da ferramenta utilizada na usinagem. Porém, o tipo de dano principal produzido na ferramenta dependerá dos valores dos parâmetros de corte e as condições do processo. O desgaste em uma ferramenta ocorre de diferentes formas, e dentre os mais comuns tem-se: lascamento do gume, desgaste na face e desgaste no flanco.

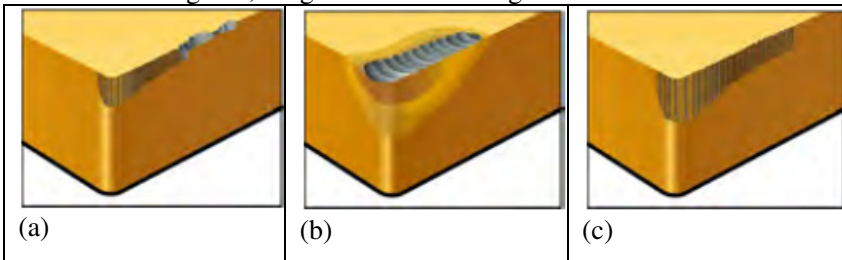


Figura 2.3. Danos mais comuns nas ferramentas. Lascamento (a), craterização (b), desgaste de flanco (c). Fonte: Sandvik, 2010.

O lascamento do gume (Figura 2.3 (a)) representa uma falha prematura da ferramenta, que ocorre devido a solicitações elevadas de origem mecânica ou térmica do gume. O lascamento do gume pode ser causado, por exemplo, por cortes interrompidos que causam golpes na ferramenta.

O desgaste da cratera ou craterização (Figura 2.3 (b)) é aquele em que o contato com o cavaco desgasta a face da ferramenta (superfície de saída). Este é um tipo de desgaste da ferramenta produzido principalmente pela difusão dos elementos do material da peça na ferramenta.

O desgaste de flanco (Figura 2.3 (c)) é aquele em que a área da ferramenta em contato com a peça é desgastada. Para avaliar-se o desgaste de flanco usa-se a medição da largura da marca de desgaste (quando não há adesão do material usinado sobre a ferramenta), e isto pode ser feito com um microscópio ótico.

Outros tipos de desgaste que ocorrem na ferramenta são: deformação plástica, entalhe, trincas térmicas e gume posticho.

Para se ter uma avaliação real do estado da ferramenta, são feitas medições de desgaste, que são feitas com microscópio, ótico ou eletrônico.

### **2.1.6 Usinagem de cavidades**

Uma cavidade é uma *feature* de usinagem que corresponde a um volume de material resultante da projeção de uma área fechada em uma das faces de uma peça, e esse volume não pode ser acessado de outra face externa. As cavidades que podem ser produzidas completamente por processos de fresamento 2,5D são conhecidas como cavidades 2,5D ou de fundo plano.

Segundo a topologia da área da cavidade projetada sobre a face da peça, os polígonos que representam as cavidades podem ser convexas ou côncavas (segundo os ângulos internos das linhas que a formam), e podem ter ou não ilhas (isto é, protuberâncias ou áreas internas fechadas que se originam do fundo da cavidade).

### **2.1.7 Seleção das ferramentas para usinagem de cavidades**

É evidente que o diâmetro máximo das ferramentas usadas em uma operação de fresamento em uma cavidade vai estar limitado pelo tamanho da própria cavidade. Porém, a seleção da ferramenta com o maior diâmetro possível resulta em um tempo de usinagem reduzido, devido ao fato de que as ferramentas de diâmetro maior têm maior quantidade de gumes, removendo uma maior quantidade de material. No entanto, existem cavidades que têm regiões estreitas, e nesse caso torna-se necessária a utilização de duas ou mais ferramentas, pois uma fresa de diâmetro maior não poderá usinar toda a cavidade. Para estas cavidades a seleção ótima das ferramentas não é simples, e este problema tem sido pesquisado por vários autores (YAO; GUPTA; NAU, 2001, HINDUJA; SANDIFORD, 2004, YINGJIE; YUNLONG, 2007, CHEN; FU, 2011, entre outros).

## 2.2. REFERENCIAL TEÓRICO DAS TRAJETÓRIAS DE FRESAMENTO DE CAVIDADES

Para poder efetuar uma operação de usinagem, além do cálculo dos parâmetros de usinagem, precisa-se da trajetória da ferramenta. Existe um número infinito de trajetórias que podem ser utilizadas para produzir uma cavidade, porém é reconhecido que há um número limitado de estratégias adequadas para gerar essas trajetórias. Cada estratégia apresenta vantagens e desvantagens, tanto em nível do processo quanto para a sua implementação (isto é, o seu cálculo em um sistema computacional).

Pode-se afirmar que a programação computacional não é simplesmente um trabalho de descrição da informação que se encontra no projeto da peça, mas também um trabalho de integração dessa informação com uma grande quantidade de conhecimentos sobre a linguagem de programação, os processos, as máquinas, as ferramentas, a matéria-prima, os parâmetros do processo e a experiência.

O trabalho de Hatna, Grieve e Broomhead (1998) foi o mais amplo encontrado até o momento referente à usinagem de cavidades. Os autores apresentam os problemas geométricos e tecnológicos do fresamento de cavidades, assim como fazem comentários sobre publicações de muitos trabalhos citados relacionados ao tema. A bibliografia revisada por eles incluiu várias estratégias de usinagem, no entanto as mais comuns são as paralelas ao contorno<sup>1</sup> (28 artigos) e paralelas a uma direção<sup>2</sup> (19 artigos). O uso de diagramas Voronoi (os quais serão descritos nesta dissertação) para a geração das trajetórias é reportado para obter estratégias do tipo paralelas ao contorno (7 artigos). Naquela publicação também são apontados quais parâmetros foram otimizados para cada pesquisa e os tipos de geometrias que foram estudadas: polígonos regulares, convexos, côncavos, sem/com ilhas; cavidades limitadas por linhas e arcos de círculo; e cavidades com forma arbitrária.

### 2.2.1 Trajetórias tipo ziguezague.

Os segmentos de usinagem das trajetórias ziguezague são linhas paralelas a uma direção arbitrária, como é apresentado na Figura 2.4 (a) e (b).

---

<sup>1</sup> Referenciados na bibliografia em inglês como trajetórias do tipo *offset* ou *contour-parallel*.

<sup>2</sup> Referenciados na bibliografia em inglês como trajetórias do tipo *zig-zag* ou *direction-parallel*.

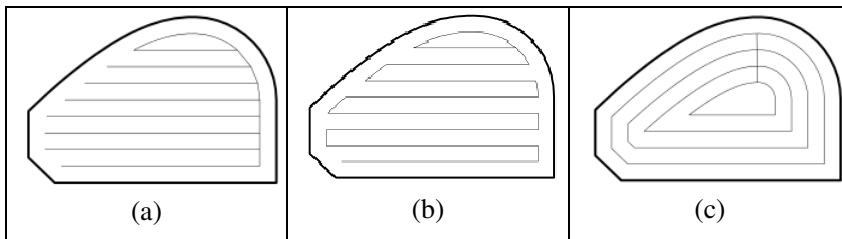


Figura 2.4. Tipos de trajetórias. Ziguezague (a) e (b), paralelas ao contorno (c).  
Fonte: Chen 2011.

Assim, para gerar esses segmentos é necessária uma direção, a profundidade radial de corte  $e$ , e de acordo com a forma da cavidade, os pontos de início e fim dos segmentos. A trajetória gerada com essa estratégia tem a vantagem de uma profundidade radial de corte constante quase todo o tempo, além de uma programação relativamente simples. Porém, essa estratégia apresenta limitações: (a) a usinagem do primeiro segmento da cavidade corresponde à execução de uma ranhura, em que a fresa efetua a usinagem completamente imersa no material da peça; (b) no final de cada um desses segmentos retos a ferramenta pode, por exemplo, voltar a um ponto próximo ao início do segmento que é finalizado com uma movimentação rápida, ou percorrer com um movimento de avanço uma linha reta paralela a uma distância específica, alternando entre fresamento concordante e discordante.

Existem trabalhos para a otimização desse tipo de trajetórias mediante a seleção da direção das trajetórias (ou o chamado *sweep angle*). Com essa seleção procura-se minimizar o número de movimentações de reposicionamento e maximizar o metal removido. O trabalho de Hatna (1998) apresenta vários deles.

### 2.2.2 Trajetórias tipo paralelas ao contorno

As trajetórias do tipo paralelas ao contorno são aquelas em que a ferramenta segue elementos geométricos paralelos ao contorno da cavidade em um movimento semelhante a uma espiral, como apresentada na Figura 2.4 (c).

Essa estratégia de geração de trajetórias apresenta a vantagem de minimizar as movimentações de reposicionamento, reduzindo o tempo de processamento. Dois métodos têm sido utilizados para gerar trajetórias paralelas ao contorno: as baseadas em *offset* dos segmentos que formam a cavidade (por exemplo: Sheen e You, 2006) e as baseadas em diagramas de Voronoi (por exemplo: Lambregts et al. 1996).

Guarnizo (2012) propõe um método para a obtenção de trajetórias paralelas ao contorno utilizando uma divisão em quadrículos da forma da cavidade e avaliando se uma ferramenta de diâmetro determinado pode ser utilizada para usinar cada posição  $(x, y)$ . Não obstante, seu método possui a limitação de depender da distância usada para a criação dos quadrículos.

Embora esse tipo de trajetória seja a melhor escolha para minimizar os tempos de usinagem para a maioria das situações, ele apresenta um problema que se torna mais importante no caso da usinagem de materiais de alta dureza. Esse problema está associado com os cantos ou, em geral, com as mudanças de direção com curvatura pequena, resultando em uma variação significativa dos ângulos de incidência<sup>3</sup> (

Figura 2.5). Este problema tem sido estudado por diferentes autores, e existem diferentes abordagens para minimizar seu efeito. O problema foi pesquisado em detalhe por Hinduja, Ma e Barrow (1995) e por Choy e Chan (2003). Hinduja, Ma e Barrow (1995) propõem o cálculo dos ângulos de incidência ao longo da trajetória, permitindo dividir a trajetória em segmentos onde o corte pode ser classificado segundo os tipos apresentados na Figura 2.6. Por outro lado, Choy e Chan (2003) apresentam uma análise das variações que ocorrem nesse ângulo nos cantos côncavos e convexos da trajetória.

As propostas para evitar ou reduzir esse problema são variadas, e dentre elas tem-se:

- A redução da velocidade de avanço quando houver um aumento do ângulo de incidência (Bae et al., 2003; Wang e Cao, 2012). Com a redução do avanço consegue-se evitar uma demanda de potência maior nos cantos. Porém, o tempo de contato da ferramenta com a peça aumenta, podendo gerar vibrações, ou desgaste excessivo na ferramenta.
- Inserção de segmentos circulares nos cantos, ou aumento dos seus diâmetros (Choy e Chan, 2003; Banerjee et al., 2011). Métodos similares encontram-se implementados nos softwares comerciais de geração de trajetórias para fresamento. Eles precisam da mudança do raio no projeto da peça ou de uma operação extra para a usinagem desses cantos. Kim (2001) apresenta um método similar, mas visando manter a potência de corte constante. Pateloup propõe

---

<sup>3</sup> Choy e Chan (2003) chamam o ângulo de incidência do material de *Cutter Swept Angle* (ou CSA), e apresentam em sua publicação a relação desse ângulo com a profundidade radial de corte.



utilizar *B-splines* para obter trajetórias suaves (Pateloup et al., 2010; Bouard, Pateloup e Armand, 2011).

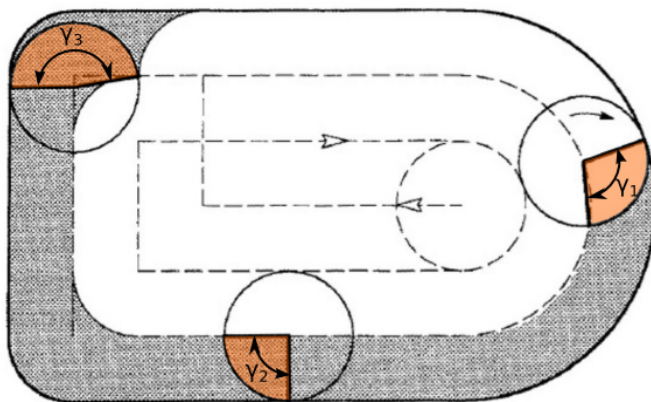


Figura 2.5. Variação do ângulo de incidência do material ( $\gamma$ ). Fonte: Boogerts, Kals e van Houten (1996). – adaptado

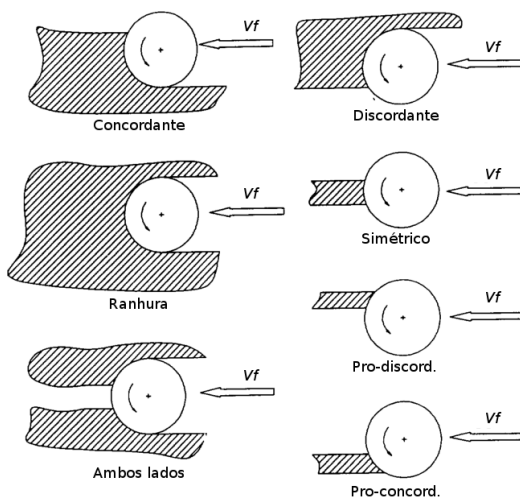


Figura 2.6. Tipos de corte que acontecem no fresamento frontal. Fonte: Hinduja, Ma e Barrow (1995) - adaptado.

- Utilização de ferramentas de diâmetro menor. Para gerar na peça um raio de concordância igual ao raio da ferramenta precisa-se que a ferramenta tenha uma mudança de direção com curvatura muito alta, mas se for utilizada uma ferramenta de diâmetro menor consegue-se produzir o mesmo raio na peça com um movimento mais suave. Porém, uma ferramenta com diâmetro menor resulta em uma taxa de remoção de material menor, e mais tempo para a operação (SANDVIK, 2010).

### 2.2.3 Métodos de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas

As trajetórias do tipo trocoidal são aquelas em que o movimento da ferramenta pode ser subdividido em um movimento circular e um movimento de translação. Assim, trajetórias de forma circular (ou aproximadamente circular) são repetidas com um deslocamento entre elas. Em teoria essa estratégia permite que se tenham sempre trocas suaves de direção, minimizando o problema gerado por trocas de direção com curvaturas pequenas (Figura 2.7). Esta trajetória foi pesquisada por Otkur e Lazoglu (2007), por Rauch, Duc e Hascoet (2009) e por Ibaraki, Yamaji e Matsubara (2010). Otkur e Lazoglu (2007) apresentam uma análise das forças de usinagem de uma operação de faceamento utilizando trajetórias trocoidais. Rauch, Duc e Hascoet (2009) estudam as restrições que o uso de trajetórias trocoidais impõe ao processo de fresamento, especialmente as relações entre o diâmetro da ferramenta, diâmetro utilizado na trajetória trocoidal e distância entre os círculos desta trajetória, e como essas variáveis determinam o ângulo de incidência no processo. Por outro lado, Ibaraki, Yamaji e Matsubara (2010) propõem utilizar a trajetória trocoidal apenas para remover as regiões críticas.

O método proposto por Ibaraki, Yamaji e Matsubara (2010) para a obtenção das trajetórias trocoidais utiliza os diagramas de Voronoi. Um diagrama de Voronoi, segundo Held (2001), é o conjunto dos pontos que podem ser usados como centros para desenhar círculos<sup>4</sup> que tocam pelo menos dois pontos dos *sites* (outro conjunto de pontos e retas), mas sem conter nenhum deles (Figura 2.8). Para a sua aplicação na geração de trajetórias para usinagem, usam-se como *sites* os polígonos que limitam a representação plana da cavidade. Assim, os pontos do diagrama de Voronoi são aqueles onde se podem desenhar

---

<sup>4</sup> Chamado *clearance disk*.

círculos inscritos tangentes ao polígono formado pela cavidade em pelo menos dois pontos.

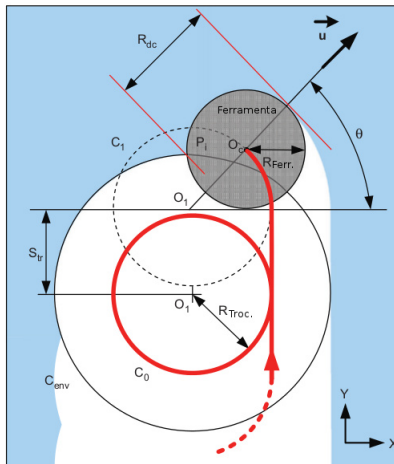


Figura 2.7. Trajetória trocoidal e seus parâmetros. Fonte: Rauch, Duc e Hascoet (2009) - adaptado.

Mais recentemente, Costa de Oliveira e Tsuzuki (2011) fazem a seguinte definição: “O diagrama de Voronoi é um conjunto de pontos que dividem a área interior de uma cavidade em áreas denominadas de regiões de Voronoi. Essas regiões estão formadas pelos pontos que têm a menor distância para uma das fronteiras da cavidade e uma distância maior para todas as outras fronteiras” (Tradução livre).

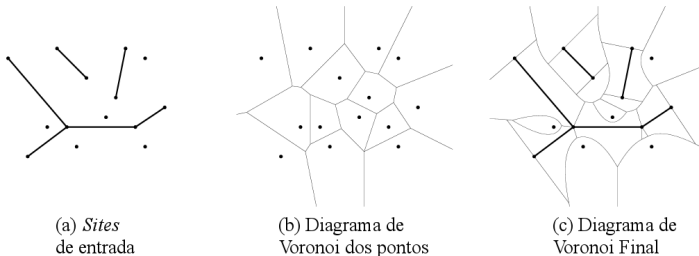


Figura 2.8. Diagramas de Voronoi. Fonte: Held (2001) - adaptado

### 2.2.4 Métodos de geração para outras trajetórias

Na literatura têm sido apresentadas outras estratégias mais complexas que as trajetórias ziguezague, paralelas ao contorno e as trocoidais. Held e Spielberg (2009) apresentam uma trajetória em

espiral, gerada com discos centrados em diagramas de Voronoi. Xiong et al. (2011) propõem utilizar diferentes estratégias segundo a forma de cada uma das regiões da cavidade, usando trajetórias em espiral ou paralelas ao contorno em áreas grandes, e trajetória trocoidal em canais ou áreas estreitas.

Por outro lado, e com o intuito de reduzir ao mínimo o tempo de usinagem, Chen e Fu (2011) propõem também utilizar os diagramas de Voronoi, mas para o que eles chamam de *desbaste agressivo*<sup>5</sup>. Esta estratégia consiste em percorrer as linhas que formam o diagrama de Voronoi usando a ferramenta de maior diâmetro possível, sem tocar a parede da cavidade, obtendo trajetórias curtas de fresamento e, conseqüentemente, tempos curtos de usinagem. Todas as trajetórias geradas com esse método têm a profundidade radial de corte constante e igual ao diâmetro da ferramenta. Porém, precisa-se de trajetórias adicionais para remover o material remanescente da cavidade.

### **2.2.5 Linguagem para programação de trajetórias: Código G**

Embora existam distintas linguagens para a programação de máquinas CNC, considera-se que todas as máquinas CNC na indústria funcionam com o chamado código G, que é uma família de linguagens baseado nas normas ISO 6983 e DIN 66025. Os códigos utilizados para cada máquina podem ser diferentes (denominados de “dialetos de comando numérico”), já que não há acordo entre os fornecedores de controles CNC. Tipicamente essas linguagens descrevem a trajetória da extremidade da ferramenta ponto a ponto.

A existência de softwares tanto para a geração de trajetórias quanto para a verificação dos programas mostra como o trabalho de programação (manual ou automática) é uma tarefa complicada, onde facilmente podem-se cometer erros. Muitas vezes os softwares geradores de código, pós-processadores e aqueles usados para verificar precisam ser específicos para um determinado controle CNC de um fornecedor.

Uns dos trabalhos referenciados nesta revisão da literatura - tanto do processo de fresamento como da geração de trajetórias - têm mais de dez anos. Entretanto, percebe-se que este é um problema complexo e relevante, como o mostra a grande quantidade de trabalhos recentes.

O método proposto neste trabalho para gerar as trajetórias é apresentado nos próximos capítulos.

---

<sup>5</sup> *Aggressive rough machining.*

### 3. MÉTODO PROPOSTO PARA A GERAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS

Neste capítulo é apresentado o método proposto para a geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas, incluindo a possibilidade do uso de várias ferramentas (fresas) para a usinagem das cavidades. Primeiramente é apresentada uma descrição do funcionamento do método (3.1), e depois descreve-se como o método foi implementado (3.2). A descrição da implementação esta dividida em diferentes partes: primeiramente a obtenção e análise do eixo médio (3.2.1 e 3.2.2), depois a geração da trajetória trocoidal e alguns exemplos (3.2.3 e 3.2.4), e finalmente o método proposto de seleção duma sequência de ferramentas e seus resultados (3.2.5 e 3.2.6).

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Dada uma cavidade (Figura 3.1 (a)), primeiramente determina-se uma área retangular onde podem ser projetados os limites da cavidade, de maneira a formar-se um ou mais polígonos<sup>6</sup>. Esses polígonos são os dados de entrada para o programa (Figura 3.1 (b)).

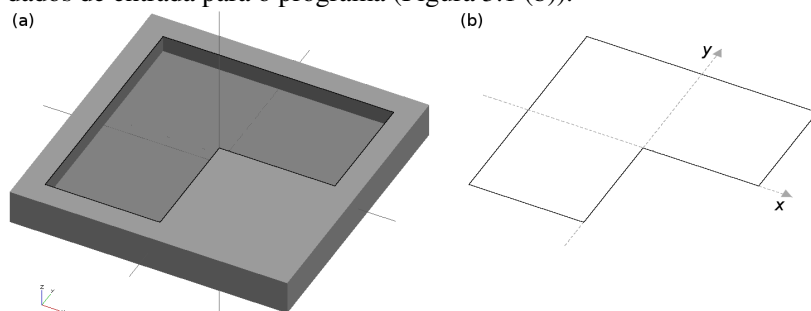


Figura 3.1. Extração de um polígono de uma cavidade simples. Fonte: elaboração própria.

Esta superfície é subdividida em quadrículos (de aproximadamente 0,5 mm de lado) e são selecionados os vértices que estejam na área que será usinada. Para a área da cavidade mostrada na Figura 3.1 (polígono em forma de L), são gerados os vértices dos quadrículos nessa área (marcados com um "x" na Figura 3.2).

<sup>6</sup> Existem diferentes métodos para se obter esses polígonos, tanto se as informações da peça encontram-se como um modelo 3D em um sistema CAD, ou em um conjunto de desenhos de fabricação. Neste trabalho considera-se o primeiro tipo.

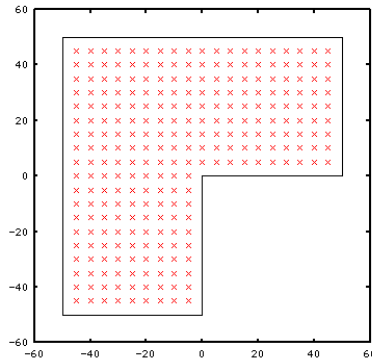


Figura 3.2. Vértices dos quadrículos localizados dentro do polígono ("x").  
Fonte: elaboração própria.

Para cada vértice dos quadrículos calcula-se a distância mínima entre as linhas que formam os polígonos obtidos no passo anterior. O cálculo da distância mínima para um ponto  $P(x,y)$  é apresentado na Figura 3.3. As linhas ( $d1 - d6$ ) representam as distâncias do ponto aos segmentos (1 - 6) que formam o polígono, respectivamente. Para os segmentos 1, 2, 5 e 6 essas distâncias são mínimas numa linha perpendicular, mas no caso dos segmentos 3 e 4 as distâncias são menores quando medidas até o ponto final delas (neste caso, no vértice onde esses segmentos se encontram). Entre todas essas distâncias foi selecionada a distância  $d6$  por ser a que tem um comprimento menor.

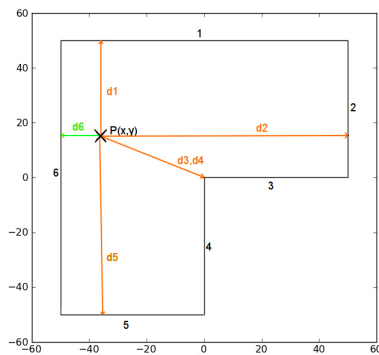


Figura 3.3. Distância mínima do ponto P ao polígono que representa a cavidade.  
Fonte: elaboração própria.

Depois são obtidos os pontos da quadrícula que sejam máximos locais em uma ou várias direções, e que fiquem dentro do polígono da cavidade, mas fora das ilhas. Esses máximos locais para a cavidade simples são apresentados na Figura 3.4.

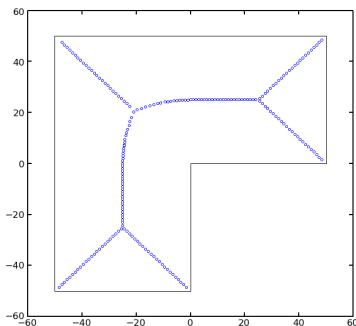


Figura 3.4. Pontos do diagrama do eixo médio para uma dada cavidade. Fonte: elaboração própria

Esses pontos compõem o eixo médio (em inglês: *medial axis* - Lee 1982, Choi 1997)<sup>7</sup>. Esses pontos são utilizados como os centros dos círculos na trajetória trocoidal, como mostrado na Figura 3.5.

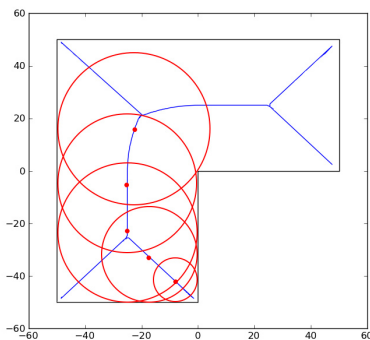


Figura 3.5. Centros dos círculos da trajetória trocoidal. Fonte: elaboração própria.

<sup>7</sup> Segundo Lee "... dado um objeto, como por exemplo um polígono simples  $G$ , o eixo médio  $M(G)$  é o conjunto de pontos  $\{q\}$  internos a  $G$  dos quais existem pelo menos dois pontos na fronteira do objeto que são equidistantes de  $\{q\}$  e são os mais próximos a  $\{q\}$ ." (tradução livre, 1982)

A trajetória é gerada levando-se em conta o diâmetro da ferramenta, o ângulo de incidência entre o material e a ferramenta e os diversos parâmetros de corte. Esta trajetória é exportada para a linguagem ISO 6983 (código G) ou equivalente.

### 3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

O método de geração de trajetórias para fresamento de cavidades 2,5D foi programado na linguagem GNU Octave (<http://www.gnu.org/software/octave/>). O GNU Octave é uma linguagem interpretada de alto nível, voltada principalmente para computações numéricas.

A linguagem Octave foi selecionada por duas razões: (a) por ter capacidade para fazer cálculos rapidamente sobre matrizes de grande tamanho; (b) por ser fácil de programar e depurar. A primeira razão é importante porque as matrizes utilizadas têm tamanhos de até quatrocentos por trezentos elementos (o que equivale a cento e vinte mil elementos), sobre os quais são aplicadas tanto operações algébricas como filtros.

Embora a linguagem Octave tenha a capacidade de fazer uma grande quantidade de cálculos em poucos segundos, precisa-se otimizar os cálculos usando o que é chamado de vetorização (*vectorization*), a qual é descrita no Apêndice A.

O algoritmo proposto pode ser dividido em duas partes: (a) obtenção do diagrama do eixo médio; (b) utilização do eixo médio para obter uma trajetória trocoidal.

#### 3.2.1 Diagrama do eixo médio

Uma cavidade de fundo plano pode ser construída utilizando-se uma série de polígonos fechados sem cruzamentos, tendo como referência um plano perpendicular às paredes da mesma. Assim, percorrendo os polígonos, tem-se uma ou várias sequências de pontos com duas coordenadas ( $x$ ,  $y$  - por estar em um plano). Uma descrição de uma cavidade desse tipo pode ser utilizada para a geração de trajetórias de fresamento, fazendo um ou vários deslocamentos perpendiculares dos segmentos (ou *offset*, como exemplo ver Lambregts et al., 1996). Entretanto, o cálculo de trajetórias complica-se quando os polígonos não são convexas ou contêm ilhas, as quais introduzem singularidades (o termo na língua inglesa é "*singularities*", o qual é usado por Hatna, 1998).

Por outro lado, o diagrama do eixo médio também pode ser utilizado como uma descrição da cavidade. Entretanto, quando são



usados somente os valores  $(x, y)$  do diagrama de eixo médio eles não determinam completamente a forma da cavidade. Para mostrar esta limitação são apresentadas duas cavidades diferentes, mas que possuem o mesmo diagrama do eixo médio (Figura 3.6). Assim, é necessário incluir o valor da distância à fronteira da cavidade ( $r$ ) para cada ponto  $(x,y)$  que pertence ao eixo médio para obter uma descrição completa.

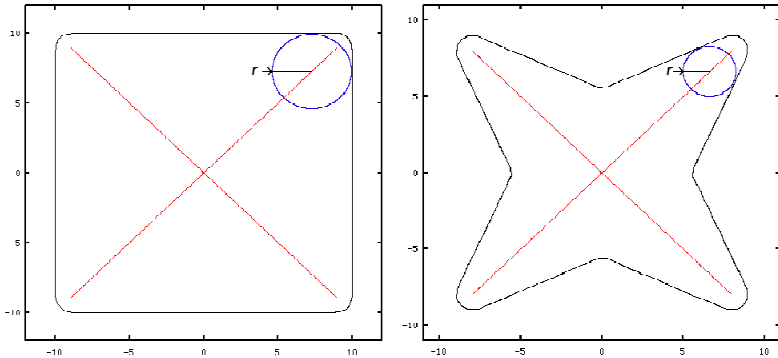


Figura 3.6. Polígonos diferentes com o mesmo diagrama do eixo médio. Fonte: elaboração própria.

Tem-se apresentado diferentes opções para o cálculo do diagrama do eixo médio (Choi 1997, Held 2001, Culver 2004, Elber; Cohen; Drake 2004). Diversas pesquisas utilizaram o código denominado VRONI apresentado por Held (2001), cujo código não está disponível. Nessa proposta ele utiliza as mediatrizes calculadas das linhas para obter o diagrama do eixo médio.

A proposta apresentada neste trabalho utiliza a chamada Montanha de Voronoi (Veeramani, Gau 2000) para a obtenção do diagrama do eixo médio. A Montanha de Voronoi é uma função do tipo  $r=f(x,y)$  onde o valor da função equivale à menor distância do ponto  $(x,y)$  para os segmentos<sup>8</sup> que limitam a cavidade. Tradicionalmente são atribuídos valores positivos de  $r$  para os pontos que ficam dentro da cavidade e negativos para aqueles fora.

### 3.2.1.1 Obtenção da Montanha de Voronoi

A Montanha de Voronoi é uma representação de uma função do tipo  $r = f(x, y)$ , onde, se o ponto encontra-se dentro da cavidade, o valor

<sup>8</sup> Neste trabalho é utilizado o termo "linha reta" para uma linha de comprimento infinito no plano  $(x,y)$ , e "segmento" para um trecho de uma linha reta que tem um ponto inicial e um ponto final.

da função é igual à distância mínima do ponto  $(x, y)$  ao polígono que representa a cavidade, mas se o ponto encontra-se fora cavidade é igual a zero. Como exemplo, a Figura 3.7 mostra, em uma representação isométrica, a Montanha de Voronoi do polígono da Figura 3.1(b).



Figura 3.7. Representação isométrica da Montanha de Voronoi obtida do polígono da Figura 3.1(b). Fonte: elaboração própria.

O primeiro passo para a obtenção da Montanha de Voronoi consiste na obtenção de duas matrizes  $(x,y)$ , em que cada elemento contém as coordenadas  $x$  e  $y$  de um ponto de uma quadrícula regular formada no plano dos polígonos que representam a cavidade. Essa quadrícula é gerada utilizando-se a instrução `meshgrid` da linguagem Octave.

```
# geração do meshgrid
[xp,yp] = meshgrid(coordx,coordy);
```

Com o intuito de calcular os valores da Montanha de Voronoi são utilizadas funções que efetuam o cálculo da distância para um ponto, para uma linha reta e para um segmento. As funções de um ponto e um segmento baseiam-se nas fórmulas da geometria analítica para este fim, e o trecho de código em Octave para este cálculo é o seguinte:

```
# distância de um ponto (px,py) para duas matrizes de coordenadas xp, yp
distancia = sqrt((yp - py)^2 + (xp - px)^2);
# distância de uma linha reta que passa pelos pontos (px, py)-(qx,qy)
# para duas matrizes de coordenadas xp, yp
longitude = sqrt((qx - px)^2 + (qy - py)^2);
distancia = abs((qx - px)*(yp - py) - (qy - py)*(xp - px)) / longitude;
```

Essas formulações são utilizadas para calcular a distância entre os pontos e um segmento. Primeiramente são calculadas as distâncias aos pontos onde o segmento inicia e termina, assim como a linha reta que passa por esses pontos. A distância de um ponto para o segmento será igual à distância ao ponto inicial, à distância ao ponto final ou à distância à linha reta segundo a sua posição. Para selecionar qual distância deve ser usada são calculadas as distâncias a uma linha perpendicular ao segmento, que passa pelo seu ponto médio, e o seu comprimento. Assim, com o intuito de determinar a distância mínima ao segmento, usa-se o valor mínimo das distâncias aos pontos inicial e final se a distância à linha perpendicular for maior do que o comprimento do segmento, e o valor da distância à linha do segmento para os quais é menor. Na Figura 3.8 é mostrada a distância calculada para um ponto  $P1$  (a), para uma linha que passa pelos pontos  $P1$  e  $P2$  (b), e para um segmento que inicia no ponto  $P1$  e termina no ponto  $P2$  (c). Esta última é formada com a utilização dos valores das áreas vermelhas.

Esse processo é repetido para cada um dos segmentos que formam a cavidade, e para cada um deles é selecionado o valor mínimo para cada ponto, correspondente à menor distância entre a coordenada do ponto e os polígonos. Esse processo é apresentado na Figura 3.9.

A representação dessa função como uma superfície tipo  $r = f(x,y)$  é chamada de montanha de Voronoi.

### 3.2.1.2 Extração do eixo médio

O passo seguinte consiste em selecionar os pontos que são máximos locais em uma ou várias direções. Para identificá-los são utilizados os que estão próximos do eixo médio. Na montanha de Voronoi os pontos que estão localizados nos máximos locais em uma ou várias direções são selecionados utilizando o operador discreto laplaciano. Esse operador é uma medida isotrópica da segunda derivada parcial espacial, e permite obter uma avaliação simples da concavidade ou convexidade da superfície. O operador encontra-se já implementado na linguagem Octave, utilizando-se a função `del2()`.

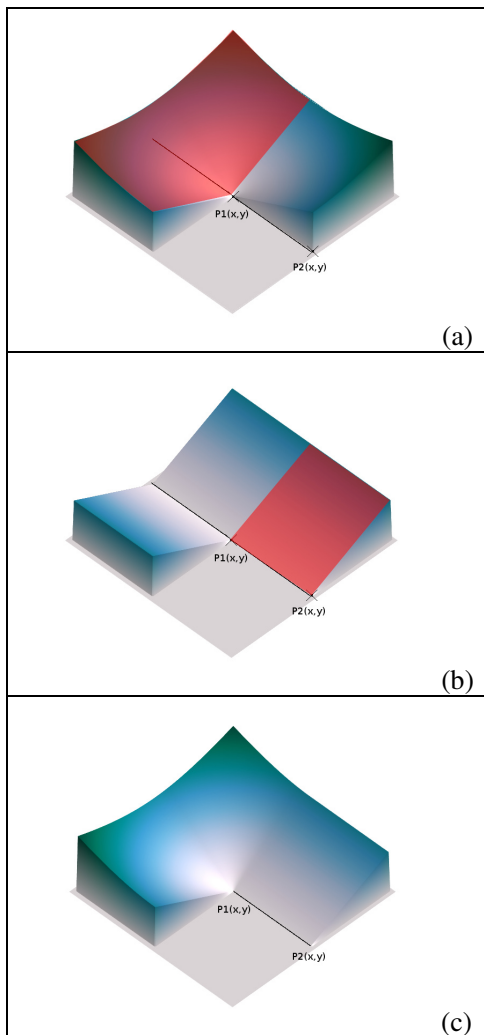


Figura 3.8. Cálculo da distância para um segmento: (a) distância para o ponto  $P1$ , (b) distância para a linha reta, (c) distância para o segmento  $P1$ - $P2$ . Fonte: elaboração própria.

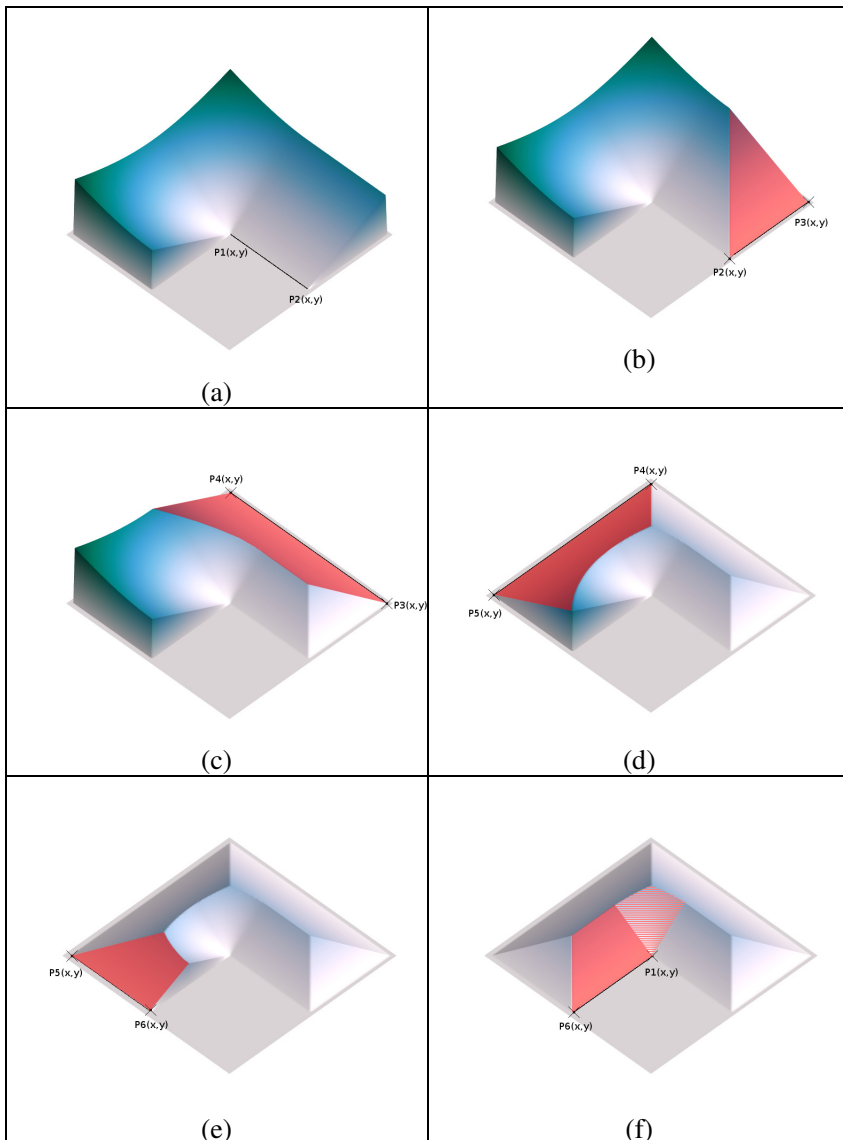


Figura 3.9. Cálculo da montanha de Voronoi. Cada letra (a)-(f) apresenta a inclusão de uma nova linha do polígono. Fonte: elaboração própria.

O comando gera como resultado uma matriz que tem o mesmo tamanho da matriz de entradas, que contém valores da segunda derivada. Com o intuito de se ter uma avaliação da segunda derivada da montanha

de Voronoi que seja comparável com o tamanho da cavidade, os valores da matriz precisam ser divididos entre o valor do incremento da quadrícula regular utilizada  $(x_p, y_p)$ . Dentre esses pontos são selecionados aqueles com valores inferiores a  $-0,23$ , que corresponde aos pontos onde a superfície é convexa. Para a obtenção desse valor máximo para selecionar os pontos de interesse foram criadas diversas cavidades e extraídos os pontos com valores desde  $-0,5$  até  $0,0$ . Assim, o valor de  $-0,23$  foi selecionado por extrair um conjunto que consegue definir a forma da cavidade completamente, usando poucos pontos. A Figura 3.10 ilustra uma representação em forma de vetores dos valores do laplaciano, mostrados em sua posição na montanha de Voronoi.

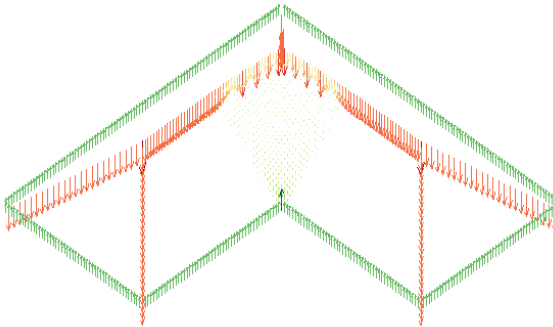


Figura 3.10. Valores do laplaciano na montanha de Voronoi. Fonte: elaboração própria.

Posteriormente é necessário corrigir os pontos obtidos, pois as suas coordenadas não necessariamente coincidem com os pontos do diagrama do eixo médio. Para fazer essa correção os componentes correspondentes do gradiente são somados aos valores  $x$  e  $y$  dos pontos selecionados. O gradiente é um vetor que tem a magnitude e a direção de maior crescimento, e ele é calculado para os pontos de uma matriz usando a função `gradient()` no Octave<sup>9</sup>.

```
# Obtenção dos pontos do eixo médio
# a variable convexas são os índices dos
# pontos seleccionados usando a função del2()
# xp, yp e rp são os pontos que formam a Montanha de Voronoi
[dx,dy]=gradient(rp);
x=xp(convexas)+dx(convexas);
y=yp(convexas)+dy(convexas);
```

<sup>9</sup> A função `gradient()` tem como saída duas matrizes, correspondentes aos componentes do gradiente nas direções  $i$  e  $j$  da matriz original.

Na Figura 3.11 é mostrada uma representação vetorial dos valores do gradiente em uma montanha de Voronoi.

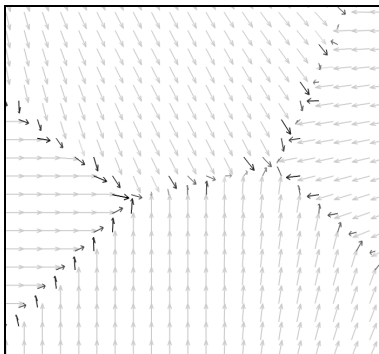


Figura 3.11. Exemplo dos valores do gradiente em uma montanha de Voronoi.  
Fonte: elaboração própria.

O processo de cálculo de distâncias para os segmentos que formam os limites da cavidade é repetido para os pontos que formam os vetores obtidos. Isto é, é calculado o valor da função  $r = f(x,y)$  para esses pontos.

### 3.2.1.3 Ordenação dos pontos

Os pontos obtidos formam o diagrama do eixo médio, embora eles encontram-se ordenados segundo seus índices originais na matriz de coordenadas. Para poderem ser utilizados na geração de trajetórias trocoidais eles precisam ser ordenados de maneira que formem uma ou várias linhas. Assim, começando com o ponto que possui o valor maior da variável  $r$ , os pontos são ordenados por proximidade.

Para ordenar os pontos começa-se por gerar uma matriz quadrada, onde cada elemento  $i,j$  corresponde à distância das coordenadas do ponto  $i$  ao ponto  $j$  obtidos nos passos anteriores. Essa matriz é gerada no Octave usando-se o trecho de código abaixo:

```
# gera uma matriz das distâncias entre os pontos
# de cordenadas x(i), y(i) aos x(j), y(j)
xx= repmat(x,1,size(x)(1));
yy= repmat(y,1,size(y)(1));
dd=((xx.-xx')^2.+(yy.-yy')^2).^(.5);
```

A matriz resultante é uma matriz simétrica com zeros na diagonal principal, e os outros elementos positivos. Para construir uma sequência

de pontos com as menores distâncias entre eles usa-se o seguinte algoritmo:

- I. Inicializa-se um vetor com um elemento correspondente ao índice do primeiro elemento dos vetores de coordenadas do eixo médio  $x$  e  $y$ .
- II. Ordena-se o vetor que forma a primeira coluna (ou fila) da matriz de menor a maior. Obtendo-se os índices do vetor ordenado. O segundo índice obtido é anexado ao vetor formado em I.
- III. Forma-se uma submatriz retirando-se a primeira linha e a primeira coluna. Daí em diante esta será a matriz utilizada.
- IV. Retirando-se o primeiro valor dos índices (correspondente ao 0 da diagonal principal), as linhas e colunas da submatriz formada em III são reordenadas.
- V. Se o tamanho da matriz for maior do que  $2 \times 2$ , retorna-se ao passo II.

Desta maneira obtém-se uma série de pontos estão no eixo médio, começando em um ponto que tem o maior valor de  $r$ , e continuando sempre para o ponto que estiver à menor distância.

### 3.2.2 Análise do diagrama do eixo médio: segmentação da área segundo o tamanho da ferramenta

O diagrama do eixo médio, conforme foi calculado, é uma sequência ordenada de pontos  $(x,y,r)$ . Estes pontos incluem toda a informação geométrica do polígono que representa a cavidade e, portanto, permitem a sua análise. Uma dos métodos utilizados nesta pesquisa consiste no gráfico do raio de círculo inscrito (no inglês: *locally inscribed circle* ou LIC) utilizada por Chen e Fu (2011). Nele são apresentados os valores do raio  $r$ , e as distâncias acumuladas ( $S$ ) entre os pontos  $x$  e  $y$ .

O cálculo da distância acumulada é efetuado da seguinte maneira: ao primeiro ponto calculado é atribuído o valor de 0; depois é calculada a distância entre esse ponto e o seguinte, e esse valor é dado para o segundo ponto; novamente é calculada a distância, agora entre o segundo ponto e o terceiro, e a distância anterior é adicionada ao valor obtido, e é atribuído ao terceiro ponto. O procedimento de cálculo continua, de forma que o valor de  $S$  para cada ponto é igual à soma de todas as distâncias entre os pontos anteriores. A Figura 3.12 apresenta uma cavidade com uma ilha, o seu diagrama de eixo médio e seu gráfico do raio do círculo inscrito.



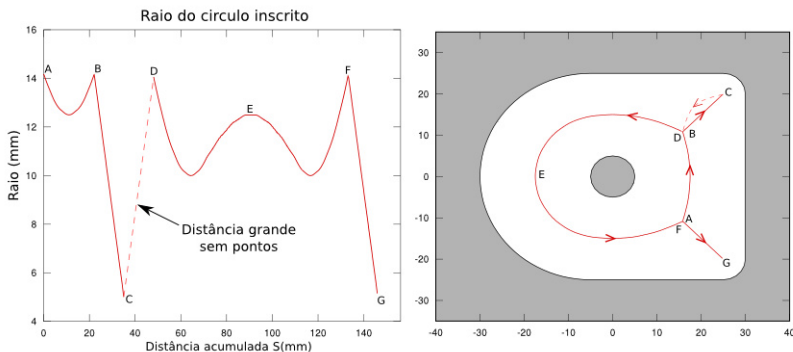


Figura 3.12. Gráfico do raio do círculo inscrito e a cavidade associada. Fonte: elaboração própria.

Dentre as informações que podem ser extraídas desse gráfico tem-se os diâmetros das ferramentas que podem ser utilizados para usinar a cavidade. A ferramenta de diâmetro menor tem que ser igual ou menor ao ponto mais inferior no gráfico (no gráfico exemplo estes pontos são o C e G). Se for maior, a ferramenta não vai conseguir usinar essa região da cavidade. A ferramenta de diâmetro maior tem que ser menor que os pontos maiores do gráfico (no exemplo da Figura 3.12 estes pontos são A, B, D e F). Se for utilizada uma ferramenta maior, ela não conseguiria entrar na cavidade, e se for utilizada uma ferramenta desse tamanho ela só conseguiria fazer movimentações no eixo z.

No caso específico de uma trajetória trocoidal precisa-se limitar mais o tamanho das ferramentas, porque se o diâmetro da ferramenta for igual à largura de um canal, por exemplo, ela poderia usiná-lo, mas a trajetória não poderá ser trocoidal. Propõe-se utilizar um limite de 1,4 vezes o raio da ferramenta para a geração da trajetória trocoidal, como é apresentado na Figura 3.13.

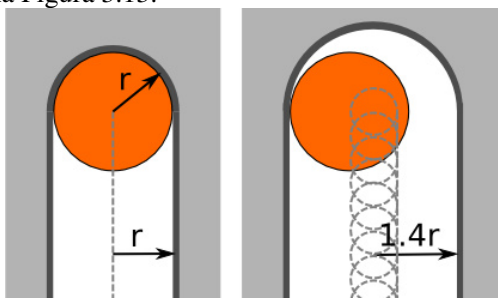


Figura 3.13. Raio mínimo considerado para a geração de trajetórias trocoidais neste trabalho. Fonte: elaboração própria.

Para efetuar-se uma segmentação da área designando qual parte será usinada por cada ferramenta, propõe-se o seguinte método: são desenhadas linhas horizontais que correspondem os raios mínimos estabelecidos para cada ferramenta disponível no gráfico do raio inscrito. Os segmentos do eixo médio são associados à ferramenta cuja linha horizontal fica mais próxima do valor do raio inscrito inferior. Um exemplo desse processo é mostrado na Figura 3.14.

### 3.2.3 Geração da trajetória trocoidal

Nas Figura 3.15 e Figura 3.16 é apresentado um fluxograma do algoritmo utilizado para gerar a trajetória trocoidal partindo do diagrama do eixo médio. O processo consiste, em termos gerais, em percorrer cada um dos pontos calculando a distância acumulada, e quando o valor acumulado atinge um valor próximo ao valor da profundidade radial de corte  $a_e$  máxima, avalia-se a quantidade de material ainda presente no círculo de diâmetro  $r$  com centro nesse ponto. Com essas informações são gerados os arcos de círculo para o fresamento.

Uma descrição mais detalhada de cada um dos blocos do fluxograma é apresentada a seguir:

- I. A distância acumulada sobre o eixo médio é inicializada como sendo igual a zero. Este processo é feito inicialmente, bem como após ter sido programado um segmento trocoidal de usinagem.
- II. A distância acumulada sobre o eixo médio é incrementada da distância do ponto  $i-1$  até o ponto  $i$ . Faz-se uma correção segundo a diferença dos raios correspondentes a cada ponto.
- III. Se a distância acumulada for menor que o valor de  $a_e$  estabelecido, vá para o passo IV; se for maior, vá para o passo V.
- IV. Incrementar o valor de  $i$ . Vá para o passo II.
- V. Partindo do ponto central, gerar um círculo dividido em 16 (dezesseis) fatias, e estabelecer em quais delas ainda há um volume de material por remover. Para essa avaliação é utilizado um sistema baseado em *pixels*: gera-se uma matriz similar à utilizada para a Montanha de Voronoi, só que nesse caso cada ponto pode ter somente dois valores: usinado ou não usinado. Os *pixels* são marcados como usinados quando a trajetória de corte passa por eles, como é mostrado na Figura 3.17.

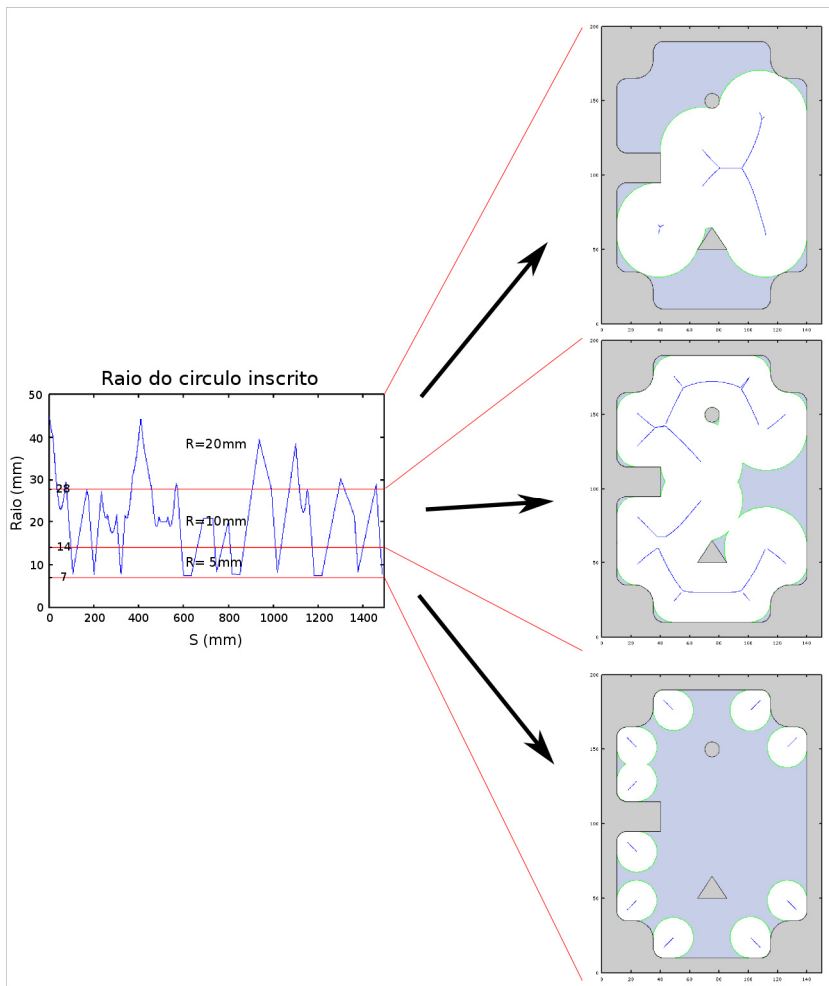


Figura 3.14. Divisão do diagrama do eixo médio segundo os raios das ferramentas (nesta figura são consideradas três ferramentas). Fonte: elaboração própria.

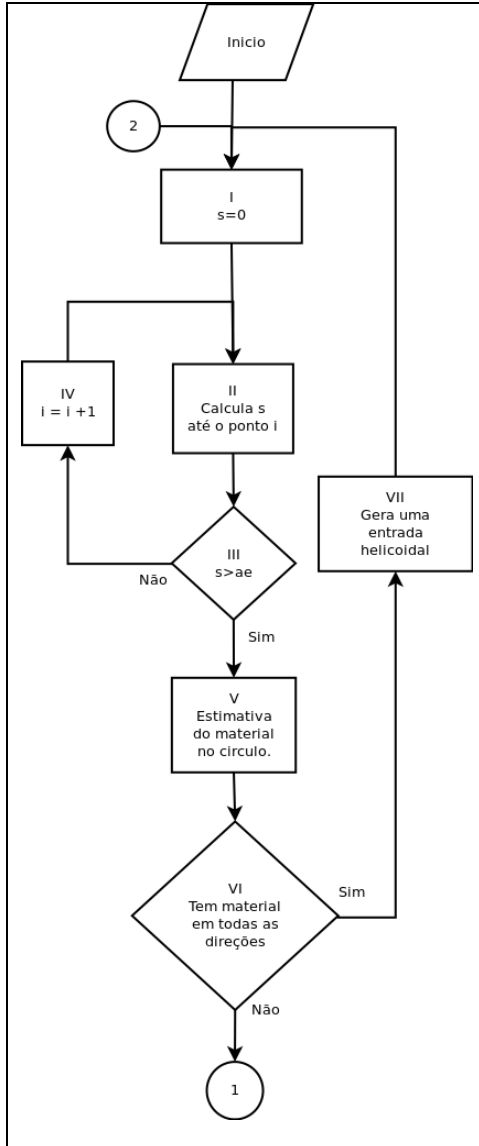


Figura 3.15. Fluxograma do algoritmo usado para gerar a trajetória trocoidal – parte 1. Fonte: elaboração própria.

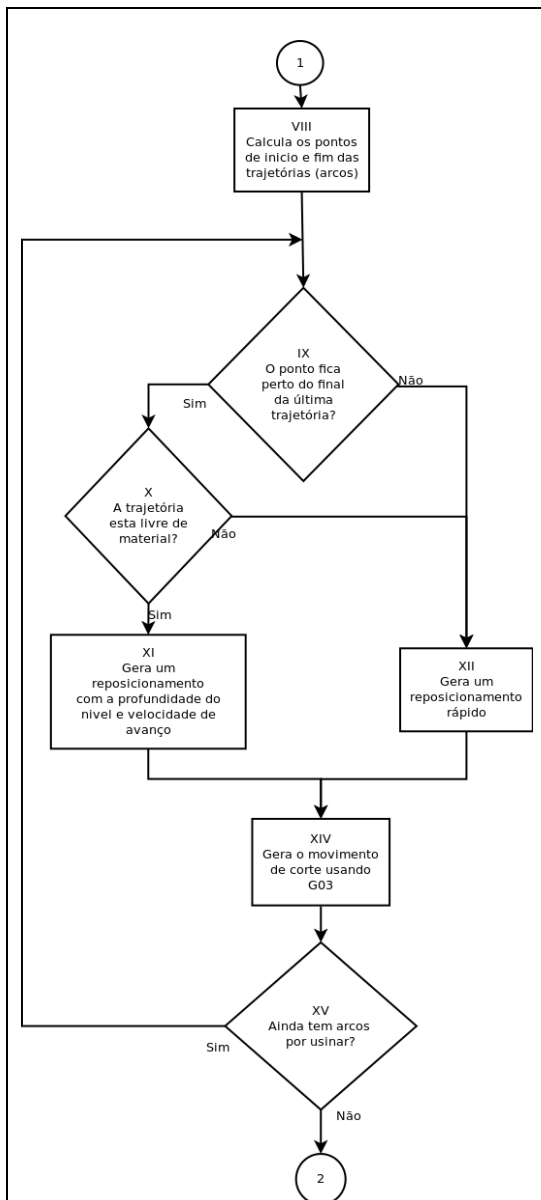


Figura 3.16. Fluxograma do algoritmo usado para gerar a trajetória trocoidal - parte 2. Fonte: elaboração própria.

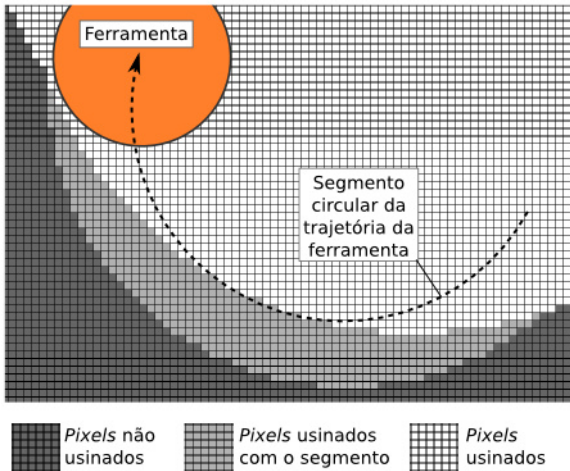


Figura 3.17. Avaliação da presença ou não de material, aplicando-se um método baseado em pixels. Fonte: elaboração própria.

- VI. Se houver material nas 16 fatias, vá para o passo VII; senão, vá para o passo VIII.
- VII. Gerar uma entrada helicoidal: primeiro é feita uma helicoide segundo as recomendações de diâmetro e ângulo máximo de rampa. Depois, se o raio do círculo usinado for menor do que o raio correspondente do eixo médio, é gerada uma trajetória em espiral até esse raio.
- VIII. Usando as informações da presença do volume não usinado em cada fatia (geradas no passo V), são calculados os pontos de início/fim dos arcos de círculo que serão utilizados para a usinagem. Um exemplo de arco de círculo é apresentado na Figura 3.18.
- IX. Para decidir se a ferramenta vai ser reposicionada no nível atual de  $z$  ou utilizando o plano de reposicionamento rápido<sup>10</sup>, é calculada a distância entre a posição atual da ferramenta e a posição do início da trajetória de corte. Se a distância for pequena, vá para o passo X; senão, vá para o passo XII.

<sup>10</sup> O “plano de reposicionamento rápido” é um plano definido por um valor da coordenada  $z$  constante, localizado acima do limite original do material e dos dispositivos de fixação. Nele podem-se fazer movimentações rápidas sem a ocorrência de colisões.

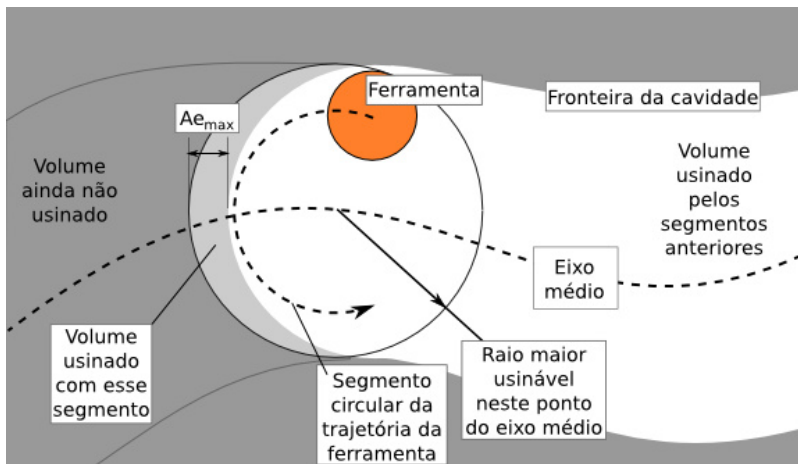


Figura 3.18. Criação de um arco de círculo que será usado na trajetória da ferramenta. Fonte: elaboração própria.

- X. Calcular se há volume não usinado entre a posição atual e o início da trajetória de corte. Se houver, vá para o passo XII; senão, vá para o passo XI.
- XI. Gerar uma trajetória linear (correspondendo ao comando “G01” de interpolação linear do código G) entre o ponto atual e o início do próximo segmento.
- XII. Efetuar três movimentações, uma para ir para o plano de reposicionamento rápido (“G00 Z”), outro até a posição inicial da trajetória de corte (“G00 X Y”), e finalmente um para retornar à coordenada z do corte.
- XIII. Gerar a movimentação de corte correspondendo à interpolação circular no sentido anti-horário (“G03”).
- XIV. Se ainda houver arcos de círculo para usinar, vá para o passo X; senão, vá para o passo I.

Já que somente mediante a geração da trajetória pode-se avaliar o tempo de usinagem, a implementação do algoritmo anterior inclui as instruções necessárias para efetuar a soma total dos tempos, usando tanto as distâncias como as velocidades de cada movimentação.

### 3.2.4 Exemplos de trajetórias obtidas com o método.

Nas Figuras 3.18, 3.19 e 3.20 são apresentadas as trajetórias obtidas com o método proposto, assim como trajetórias paralelas ao contorno simples, também geradas pelo autor. São apresentados também

os comprimentos totais e o tempo estimado de usinagem e, para as trajetórias trocoidais, incluem-se o comprimento e o tempo total das movimentações dos arcos circulares e segmentos helicoidais, sendo elas as únicas que fazem remoção de material.

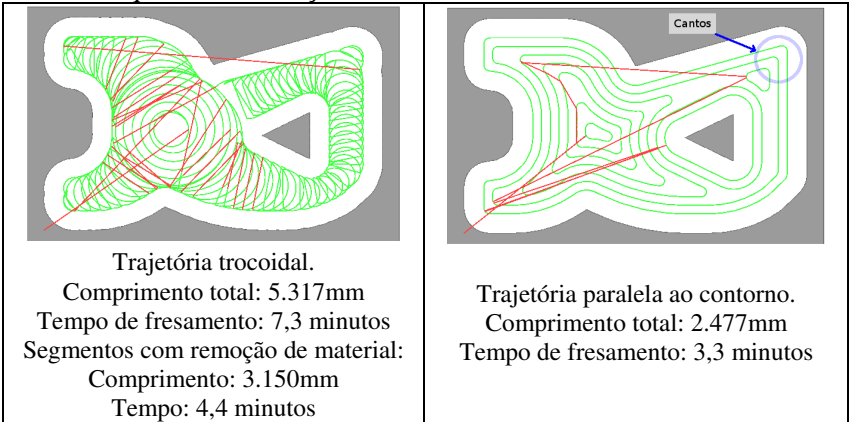


Figura 3.19. Trajetórias trocoidal e paralela ao contorno de uma cavidade.  
 Fonte: elaboração própria.

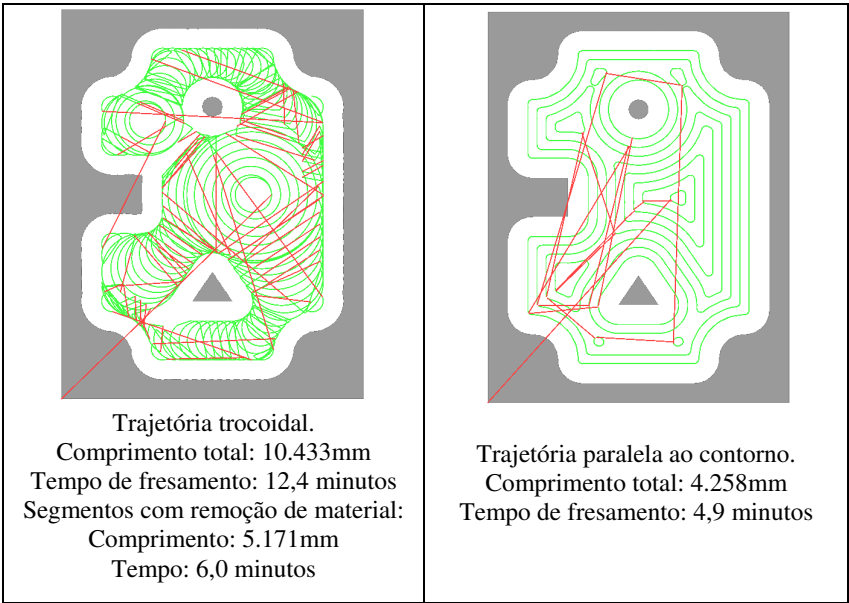


Figura 3.20. Trajetórias trocoidal e paralela ao contorno de uma cavidade.  
 Fonte: elaboração própria.



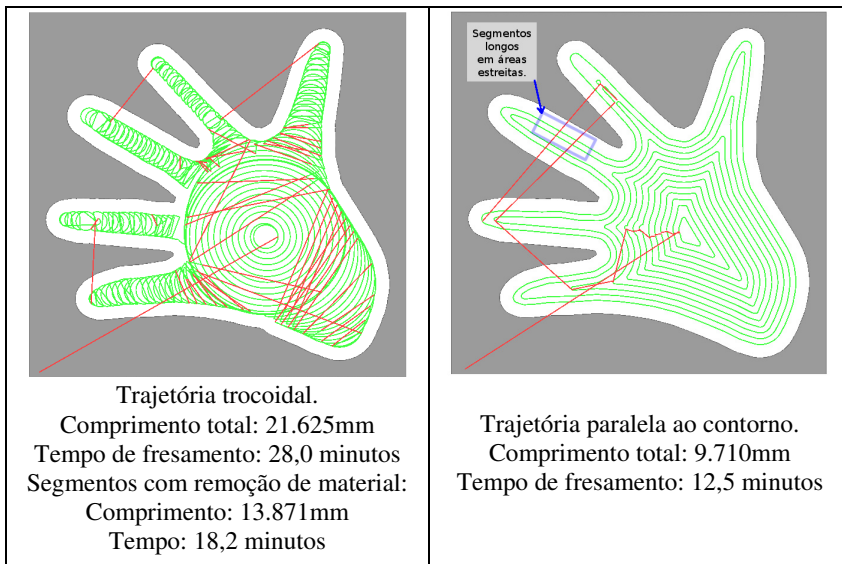


Figura 3.21. Trajetórias trocoidal e paralela ao contorno de uma cavidade.  
Fonte: elaboração própria.

Percebe-se nas figuras anteriores que as trajetórias geradas com o método apresentado têm um comprimento de aproximadamente 2,3 vezes as trajetórias paralelas ao contorno, mas os comprimentos dos segmentos com remoção de material são 1,3 vezes maiores. Porém, pode-se afirmar que as trajetórias paralelas ao contorno geram cantos onde o ângulo de incidência do material pode ser muito elevado, além de linhas retas em áreas estreitas onde a primeira movimentação produzirá um corte tipo ranhura (ver Figura 2.6).

### 3.2.5 Otimização do tempo de operação mediante a seleção das ferramentas.

Antes de gerar o código definitivo e com o intuito de obter tempos de operação mais curtos, foi desenvolvido um método para buscar as sequências de ferramentas que resultam em tempos menores de usinagem. Para poder avaliar cada uma das ferramentas foi gerada uma tabela com os parâmetros de operação (Tabela 3.1), usando-se ferramentas da família MEC da fabricante Kyocera. A utilização das informações do catálogo da Kyocera para a obtenção desses dados é apresentada no Capítulo 4.

A partir dessas informações e utilizando os métodos propostos para a segmentação da área e a geração das trajetórias, pode-se efetuar



Tabela 3.1. Parâmetros de operação utilizados para a família das ferramentas MEC da fabricante Kyocera. Fonte: elaboração própria.

Diâmetro da ferramenta	Velocidade de corte	Avanço por dente	Número de gumes	Velocidade e do fuso	Velocidade e de avanço			Âng. Máx. de Rampa
$D$ (mm)	$V_c$ (m/min)	$f_z$ (mm/d)	$Z_c$	$n$ (rpm)	$V_f$			$\alpha^\circ$ (graus)
					$x,y$	Hel.	$z$	
					(mm/min)			
<b>10</b>	120	0,07	1	3820	267	107	27	0
<b>12</b>	120	0,10	1	3183	318	127	32	0
<b>14</b>	120	0,10	1	2728	273	109	27	0
<b>16</b>	120	0,15	2	2387	716	286	72	3
<b>20</b>	120	0,15	3	1910	859	344	86	5
<b>22</b>	120	0,15	3	1736	781	313	78	2,5
<b>25</b>	120	0,15	3	1528	688	275	69	2,5
<b>28</b>	120	0,15	3	1364	614	246	61	1,5
<b>30</b>	120	0,15	4	1273	764	306	76	1,5
<b>32</b>	120	0,15	4	1194	716	286	72	1,5
<b>40</b>	120	0,15	5	955	716	286	72	0,7

VI.  $i = i+1$ ; Se  $i=(m-1)$  vá para o passo VII; senão vá para o passo IV.

VII. Com o intuito de decidir entre as ferramentas maiores, é necessário o cálculo adicional abaixo:

- (a) ferramentas adicionadas anteriormente ao conjunto de ferramentas a serem utilizadas, a ferramenta  $m-1$  e a ferramenta  $m$ .
- (b) ferramentas adicionadas anteriormente ao conjunto de ferramentas a serem utilizadas, a ferramenta  $m$ .
- (c) ferramentas adicionadas anteriormente ao conjunto de ferramentas a serem utilizadas, a ferramenta  $m-1$ .

VIII. Dentre os tempos obtidos no passo VII é selecionada a combinação com o tempo mais curto.

Um exemplo dos resultados obtidos com esta metodologia é apresentado na Figura 3.22. É importante ressaltar que esses resultados

dependem não somente dos diâmetros das ferramentas e dos parâmetros de usinagem, mas também da forma da cavidade.

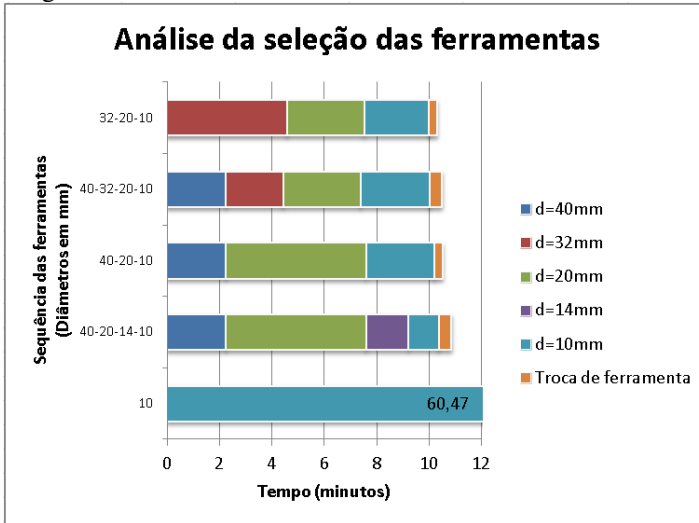


Figura 3.22. Tempos de usinagem de uma cavidade para diferentes combinações de ferramentas. Fonte: elaboração própria.

### 3.2.6 Resultados obtidos com o método.

O método descrito e implementado foi utilizado em várias cavidades, e as trajetórias obtidas são apresentadas a seguir. Na Figura 3.23 e 3.24 são apresentadas as trajetórias geradas, usando-se o método proposto neste trabalho, para cavidades apresentadas nas publicações de Elber, Cohen e Drake (2004) e Hinduja, Mansor e Owodunni (2010).

Na Figura 3.25 são apresentadas as trajetórias geradas para a cavidade que foi usinada na parte experimental desta pesquisa. Essa trajetória foi utilizada para usinar a cavidade como é mostrado no Capítulo 4, e a análise da usinagem é apresentada no Capítulo 5.

Em decorrência de que a precisão relativa dos cálculos no Octave<sup>12</sup> está tipicamente numa ordem de magnitude de  $10^{-15}$  estima-se que os erros geométricos e dimensionais decorrentes da utilização de trajetórias trocoidais puras (apresentados na seção 5.1.4) são maiores do que aqueles que ocorrem por erros de cálculo.

<sup>12</sup> Obtida no mesmo Octave com a função eps().

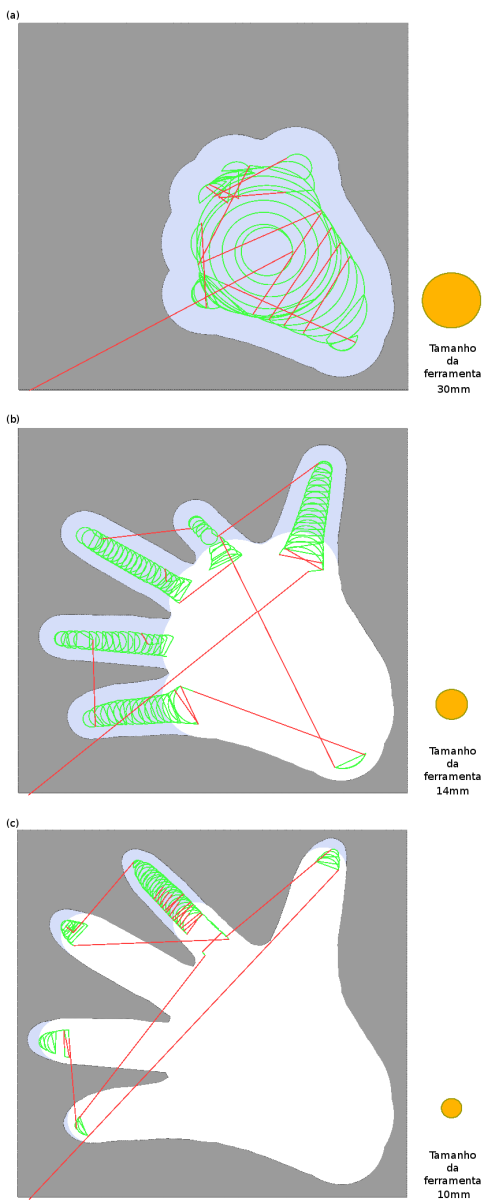


Figura 3.23. Sequência de trajetórias para múltiplas ferramentas geradas para uma cavidade com forma de mão. (a) Ferramenta com  $d=30\text{ mm}$ , (b)  $d=14\text{ mm}$ , (c)  $d=10\text{ mm}$ . Fonte: elaboração própria.

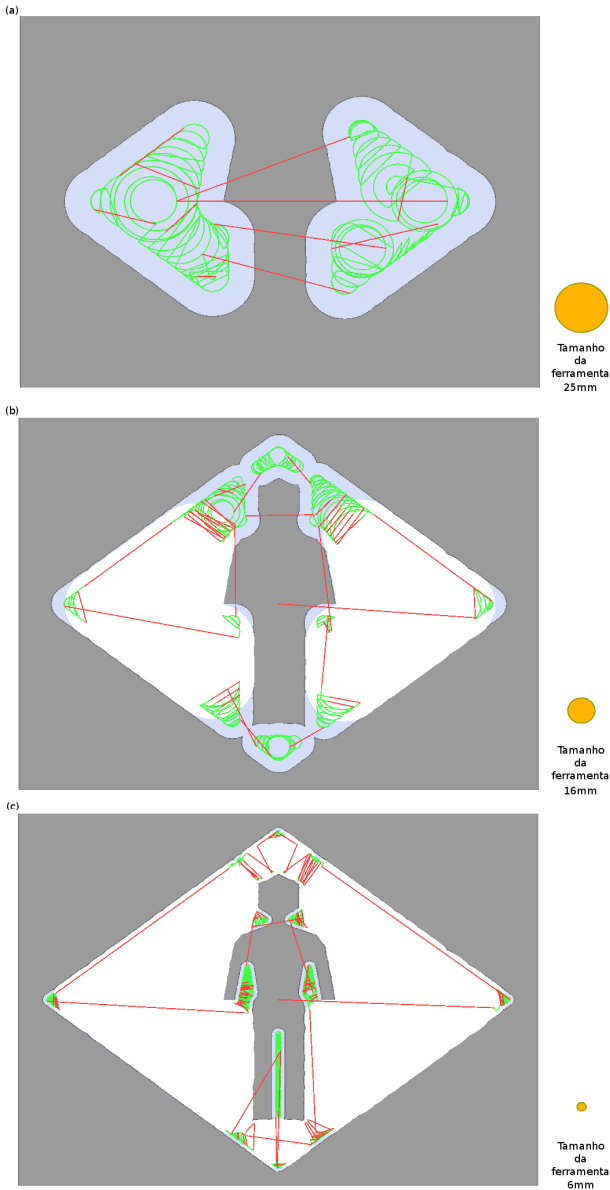


Figura 3.24. Sequência de trajetórias para múltiplas ferramentas geradas para uma cavidade com forma humana. (a) Ferramenta com  $d=25$  mm, (b)  $d=16$  mm, (c)  $d=6$  mm. Fonte: elaboração própria.

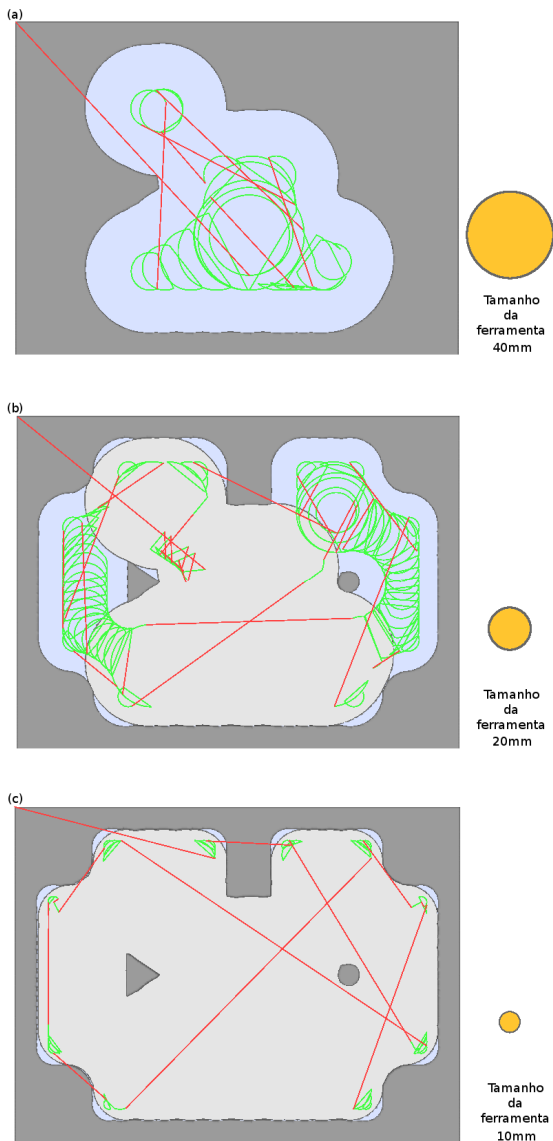


Figura 3.25. Trajetórias geradas para múltiplas ferramentas para a usinagem de uma cavidade usada na parte experimental deste trabalho. (a) Ferramenta com  $d=40$  mm, (b)  $d=20$  mm, (c)  $d=10$  mm. Fonte: elaboração própria.





#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS PARA OS TESTES DE FRESAMENTO

Para a execução dos testes de usinagem foi utilizada a peça mostrada na Figura 4.1, a qual contém uma cavidade com duas ilhas. Um desenho com todas as dimensões encontra-se no Apêndice B (Figura B.1). A peça possui dimensões que permitem a utilização das ferramentas disponíveis para a sua usinagem.

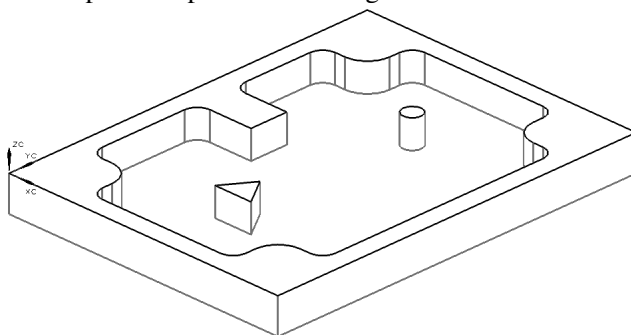


Figura 4.1. Cavidade utilizada nos testes de usinagem. Fonte: elaboração própria.

##### 4.1 GERAÇÃO DOS PROGRAMAS DE COMANDO NUMÉRICO

A cavidade mostrada na Figura 4.1 foi usinada de duas maneiras: uma com o código gerado segundo o método descrito neste trabalho (denominado OC2PATH), e outra utilizando o código gerado pelo módulo de fabricação do programa comercial UGS-NX<sup>13</sup>. A mesma sequência de ferramentas foi utilizada para as duas cavidades, e o método proposto foi utilizado para fazer uma seleção, e a combinação obtida foi utilizada tanto com o OC2PATH como com o NX.

##### 4.2 AVALIAÇÃO USANDO SIMULADORES

Antes da utilização do código G no centro de usinagem CNC, foram utilizados simuladores para avaliar as trajetórias geradas pelos diferentes programas de comando numérico. Devido à complexidade do processo de geração de trajetórias para fresamento é necessário avaliar as trajetórias em um simulador para evitar que ocorram erros na programação, como por exemplo: colisões (entre ferramenta, peça, elementos de fixação e máquina); superposição de trajetórias.

Embora existam inúmeros softwares para simular e avaliar as trajetórias de usinagem, as características de três desses softwares são

<sup>13</sup> Esse processo é detalhado no APÊNDICE B - Geração de trajetórias com o UGS NX®.

apresentadas na tabela 4.1. Devido às suas diferentes características, esses três softwares foram utilizados em diferentes momentos no desenvolvimento desta pesquisa.

Tabela 4.1. Comparação dos simuladores CNC utilizados neste trabalho. Fonte: elaboração própria.

<i>Nome</i>	<i>SinuTrain</i> <sup>®</sup>	<i>Cncsimulator Pro</i> <sup>®</sup>	<i>Openscam</i> <sup>®</sup>
Versão	6.03 Edition 3	1.0.4 - 1.0.6	0.10
Desenvolvedor	Siemens	cncsimulator.com	Joseph Coffland e outros
Site	siemens.com	cncsimulator.com	openscam.com
Tipo de licença	Comercial	Comercial / Gratuito <sup>14</sup>	Código aberto
Sistema operacional	Windows	Windows	Windows/Linux
Compatibilidade completa com o controle	Sim. O dois são Siemens	Não, faltam códigos do controle e há diferenças na interpretação dos programas CNC.	Não, faltam códigos do controle.
Representação rápida da trajetória	Não, existe uma demora no processo de carregar o programa.	Sim	Automático, a trajetória é atualizada sempre que o arquivo no computador é modificado.
Simulação do material removido	Sim. A cada passo.	Sim. A cada passo.	Sim. Só o estado ao final de todo o programa.
Simulação de outros elementos na máquina	Não	Sim	Não

Assim, cada um desses softwares apresenta vantagens, e todos eles foram utilizados como segue: primeiramente o *software* é preparado com as informações de diâmetro das ferramentas e a geometria do bloco de matéria-prima. Depois o arquivo do programa de usinagem (em

<sup>14</sup> O programa Cncsimulator Pro é disponibilizado sem custo, desde que o usuário retorne ao site regularmente e efetue um processo de reativação.

código G) é aberto, e o software gera uma ou mais representações gráficas na tela do computador, tanto da trajetória como do processo de remoção de material que produziria esse código no processo de usinagem. O usuário então faz uma avaliação das trajetórias.

Estudando as representações das trajetórias geradas por esses programas foram verificados os seguintes pontos:

- Limites gerais das movimentações da máquina, correspondência com o esperado na peça/máquina.
- Verificar que a movimentação rápida somente seja utilizada onde não existe material.
- No caso do código gerado com o algoritmo OC2PATH: consistência da profundidade de corte  $a_e$ . Que seu maior valor não seja muito diferente ao valor esperado.
- Verificar possíveis colisões entre os elementos de fixação.
- Verificar os tempos de fresamento.
- Verificar a compatibilidade dos códigos gerados com o controle, no software SinuTrain.

Mesmo utilizando os três programas, ocorreram erros na programação que não ficaram evidentes até a usinagem. O principal foi uma entrada helicoidal com um diâmetro da helicoides menor que o permitido pela ferramenta.

#### 4.3 ESPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA FERRAMENTA UTILIZADA

A máquina utilizada nos testes foi uma Fresadora Charles MVC-955, com CNC Siemens Sinumerik 840Di. As principais características da máquina encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Especificações da Fresadora MVC-955. Fonte: elaboração própria.

<b>Especificação</b>	<b>Valor</b>
Curso da mesa (eixos X, Y)	900x550 mm
Curso do cabeçote (eixo Z)	530 mm
Rotação máxima do eixo - árvore	8000 RPM
Potência do motor principal	7,5 Kw
Avanço rápido (eixos X, Y)	20 m/min
Avanço rápido (eixo Z)	15 m/min

Nos testes de fresamento foi utilizado fluido refrigerante Ultracut 370 plus, do fabricante ROCOL, aplicado mediante jato direto. O fluido foi diluído segundo as recomendações do fabricante, numa proporção 40:1.

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL USINADO

Após as trajetórias terem sido revisadas são efetuados os testes de usinagem. Foi selecionado o aço AISI P20 para os testes de usinagem, o qual é um aço ferramenta de baixa liga que é utilizado na fabricação de moldes. Este material foi escolhido por sua grande aplicação em moldes de injeção e outros componentes usinados.

Para os testes de usinagem foram utilizados blocos de 300x200x50 mm, com dureza Rockwell C (HRC) igual a 31. Uma caracterização completa do material (blocos do mesmo fabricante e lote) foi apresentada em Guarnizo (2012).

#### 4.5 PARÂMETROS DE USINAGEM UTILIZADOS NOS TESTES

Foram utilizadas três ferramentas da linha MEC da Kyocera: (a) 10-S10-11; (b) 20-S20-11T e (c) 40-S32-11T. A primeira possui inserto BDMT 110308ER-JT, enquanto as outras usam insertos BDMT 11T308ER-JT, todas com cobertura PR830 também da Kyocera.

Com base nas informações do fornecedor, foram selecionados os parâmetros para o fresamento, como são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Parâmetros de corte utilizados. Fonte: elaboração própria.

Parâmetros de corte	Ferramenta		
	<b>10-S10-11 (10 mm)</b>	<b>20-S20-11T (20 mm)</b>	<b>40-S32-11T (40 mm)</b>
Velocidade de corte	$V_c = 120$ m/min	$V_c = 120$ m/min	$V_c = 120$ m/min
Velocidade de avanço	$f_z = 0,07$ mm/d	$f_z = 0,12$ mm/d	$f_z = 0,12$ mm/d
Profundidade axial	$a_p = 0,5$ mm	$a_p = 0,5$ mm	$a_p = 0,5$ mm
Profundidade radial (max)	$a_e = 2,25$ mm	$a_e = 4,5$ mm	$a_e = 9$ mm
Âng. máx. de rampa	Não recomendado	$\alpha^\circ = 5^\circ$	$\alpha^\circ = 0,7^\circ$

A velocidade de corte foi selecionada como sendo igual a 120m/min, já que é um valor próximo do centro das velocidades de corte recomendadas (80-150 m/min). Os valores de avanço por dente

também foram selecionados próximos do centro da área recomendada, sendo menor o avanço para a ferramenta de diâmetro 10 mm.

A profundidade axial  $a_p = 0,5$  mm foi selecionada por duas razões: (a) devido às recomendações para a ferramenta de diâmetro 10 mm; (b) com o intuito de ter-se um tempo de usinagem mais elevado de maneira a avaliar as trajetórias com menor taxa de remoção de material ( $Q$ ). Com este valor de  $a_p$ , e como a profundidade da cavidade usinada foi de 20 mm, cada trajetória no plano  $x,y$  foi executada 40 vezes.

Os ângulos das rampas ( $\alpha^\circ$ ) foram sempre menores do que os recomendados, já que com a profundidade axial  $a_p$  utilizada o ângulo resultava menor. Isto ocorreu porque a trajetória helicoidal foi programada para fazer pelo menos uma revolução completa.

Com esses dados sendo inseridos nas fórmulas apresentadas no Capítulo 2, foram calculados os parâmetros de operação da máquina, os quais são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Parâmetros de operação da máquina calculados. Fonte: elaboração própria.

Parâmetros de operação	Ferramenta		
	<b>10-S10-11 (10 mm)</b>	<b>20-S20-11T (20 mm)</b>	<b>40-S32-11T (40 mm)</b>
Velocidade de giro	$n = 3820$ rpm	$n = 1910$ rpm	$n = 955$ rpm
Velocidade de avanço	$V_f = 267$ mm/min	$V_f = 859$ mm/min	$V_f = 716$ mm/min
Taxa de remoção com $a_e = a_{emax}$ (constante)	$Q = 300$ mm <sup>3</sup> /min	$Q = 1933$ mm <sup>3</sup> /min	$Q = 3222$ mm <sup>3</sup> /min



## 5. RESULTADOS DOS TESTES

As trajetórias geradas tanto com o método desenvolvido neste trabalho (OC2PATH) como com o programa comercial UGS NX foram usadas para usinar a cavidade. Na Figura 5.1 é apresentada uma fotografia das cavidades usinadas.

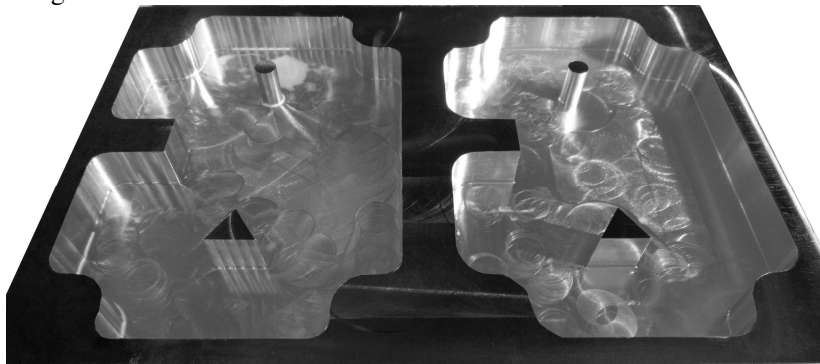


Figura 5.1. Fotografia das cavidades usinadas. (OC2PATH: esquerda, NX: direita). Fonte: elaboração própria.

Esses experimentos permitiram avaliar as trajetórias em três aspectos: (a) uma análise detalhada dos tempos para cada trajetória; (b) uma comparação da potência requerida do motor principal da fresadora CNC ao longo de cada trajetória. Além dessas análises foram feitas fotografias com um microscópio ótico dos gumes ao final dos testes (apresentados no Apêndice E).

A cavidade foi usinada utilizando três fresas de diferentes diâmetros (40 mm, 20 mm e 10 mm). Na Figura 5.2 é apresentada a divisão das áreas usinadas por cada ferramenta que foi feita pelo OC2PATH.

### 5.1 DETALHAMENTO DOS TEMPOS

Conforme apresentado no capítulo 2, quando são utilizados os mesmos parâmetros de corte ( $a_p$ ,  $a_e$ ,  $V_f$ ), a taxa de remoção de material ( $Q$ ) teria que permanecer a mesma, e levando em conta que o material removido é o mesmo, os tempos das movimentações de usinagem teriam que ser equivalentes. Entretanto, de maneira geral, para uma mesma cavidade as estratégias usadas para a geração das trajetórias por diferentes softwares acabam contendo diferenças, especialmente o valor da profundidade radial  $a_e$ .

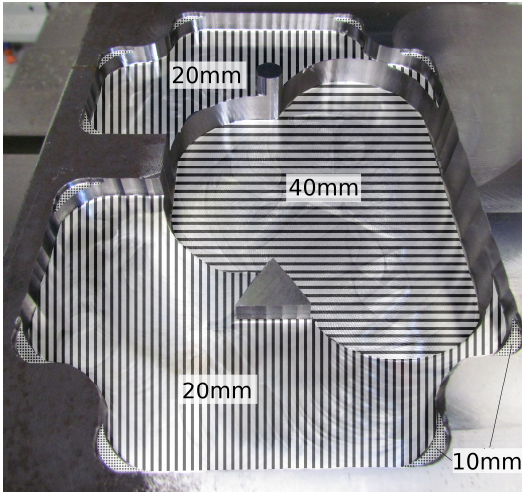


Figura 5.2. Divisão das áreas segundo o diâmetro da ferramenta utilizado para usiná-las. Fonte: elaboração própria.

Além disso, normalmente a ferramenta se afasta do material e é reposicionada para continuar o processo de usinagem em outro ponto. As trajetórias das ferramentas têm normalmente movimentações em que a ferramenta não está em contato com o material. Essas movimentações, que são chamadas de movimentações "em vazio", representam um tempo de processamento que não agrega valor ao processo, e deve-se evitá-las ou que sejam executadas com o maior avanço possível.

Neste trabalho o tempo total do processamento é considerado como sendo igual à soma das movimentações de corte efetivo com as movimentações em vazio.

A análise detalhada é importante também porque, ao longo da pesquisa, verificou-se que a fresadora utilizada para os testes de usinagem produz um erro quando utilizada no máximo avanço (comando G00). Este erro é mostrado pelo CNC, causando uma interrupção da sequência de fresamento. Com o intuito de evitar a ocorrência desse problema, foi utilizado um avanço abaixo do máximo teórico da máquina para as movimentações rápidas. Assim, a análise detalhada do tempo permite também estimar os tempos de processamento se a máquina conseguisse usar os avanços máximos.

Os tempos totais da operação foram divididos de acordo com o tipo de movimentação. A nomenclatura baseia-se nos códigos da norma ISO 6983 (código G) como listado abaixo:



- **G00:** Tempos utilizados para reposicionamento rápido da ferramenta.
- **G01:** Tempos utilizados em movimentações de corte que formam linhas retas.
- **G02:** Tempos utilizados em movimentações de corte circulares, que ocorrem no sentido horário.
- **G03:** Tempos utilizados em movimentações de corte circulares, que ocorrem no sentido anti-horário.
- **G01 Z:** Movimentações que ocorrem seguindo somente o eixo Z. São as movimentações que ocorrem depois de um afastamento e reposicionamento, quando a ferramenta é movida para uma posição em que não há material. Por motivo de segurança essas movimentações são lentas, mesmo não ocorrendo remoção de material.
- **HEL:** Movimentações simultâneas dos três eixos, compostas de uma interpolação circular nos eixos x,y e um avanço constante no eixo z. Esta movimentação foi utilizada para a ferramenta entrar ao material.

### **5.1.1 Análise dos tempos usando-se a ferramenta de diâmetro 40 mm**

Na Figura 5.3 é apresentado um gráfico com os tempos da máquina com as trajetórias da ferramenta de diâmetro 40 mm, para as trajetórias geradas pelo software desenvolvido neste trabalho (OC2PATH), e pelo software comercial UGS NX.

Os comprimentos totais das trajetórias foram de 62,5m para a trajetória gerada pelo software OC2PATH e 80,6m para a gerada pelo software NX (sem as movimentações de reposicionamento rápido).

Uma diferença importante que pode ser observada na figura com relação à distribuição dos tempos, o software NX gera a trajetória trocoidal utilizando círculos completos, enquanto o método apresentado efetua movimentações lineares para reduzir os tempos. Assim, o método proposto tem um tempo utilizando o comando G01 muito maior, enquanto um comando G03 menor em comparação com a trajetória gerada pelo software NX.

### **5.1.2 Análise dos tempos da ferramenta diâmetro 20 mm**

Na figura 5.2 é apresentado um gráfico com a distribuição dos tempos usados pela máquina com as trajetórias da ferramenta de diâmetro 20 mm (trajetória geradas pelos softwares OC2PATH e NX).

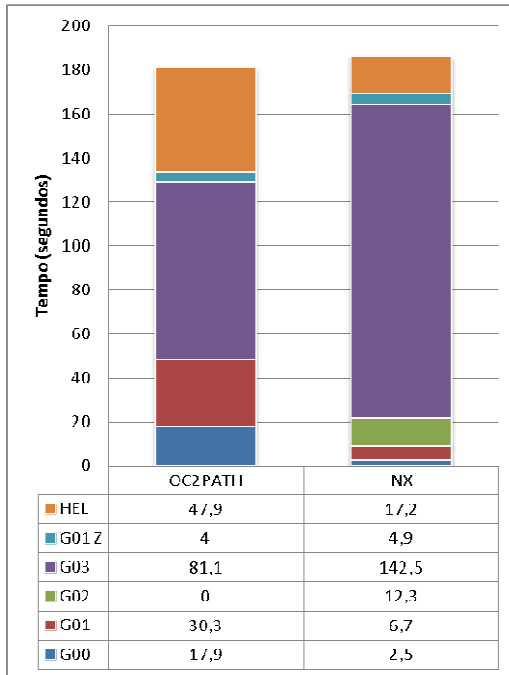


Figura 5.3. Detalhamento dos tempos de usinagem com a ferramenta de diâmetro 40 mm. Fonte: elaboração Própria.

Os comprimentos totais das trajetórias foram de 233,6m para a trajetória gerada pelo software OC2PATH e 151,9m para a gerada pelo software NX (sem as movimentações de reposicionamento rápido, mas incluindo a operação de pré-acabamento no caso do software OC2PATH).

Percebe-se que nestas trajetórias os tempos das movimentações rápidas (G00) para o OC2PATH é maior do que para o NX, e por este motivo é necessário considerar a limitação da máquina para os avanços rápidos. Embora essa limitação tenha acrescentado tempo para as duas trajetórias, no caso da trajetória do software OC2PATH a influência é maior. Se, por exemplo, a máquina tivesse avanços de reposicionamento rápido de 10.000 mm/min os tempos correspondentes seriam de 17,5 segundos para a trajetória do OC2PATH, e 4,0 segundos para o software NX. O valor total seria igual a 395,7 segundos para a trajetória do OC2PATH, e 322,2 para a trajetória do NX. Além dessa diferença e considerando que a trajetória gerada pelo OC2PATH não utiliza o comando G02 (e, portanto, incluindo esses tempos nos tempos do

comando G01), a distribuição dos tempos é similar, embora o tempo do NX seja menor.

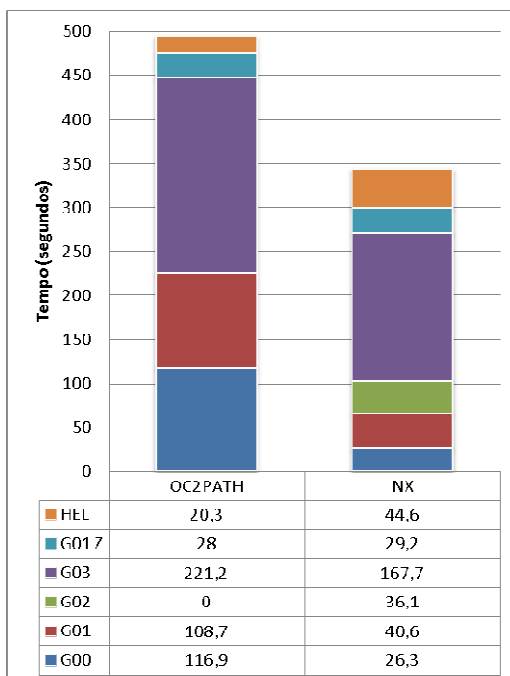


Figura 5.4. Detalhamento dos tempos de usinagem com a ferramenta de diâmetro 20 mm. Fonte: elaboração Própria.

Também foi observado que o software NX gerou pelo menos dois segmentos helicoidais em espaços onde o material já tinha sido removido pela ferramenta com diâmetro de 40 mm. Na Figura 5.5 é mostrado esse erro em uma representação das trajetórias das ferramentas, e percebe-se que a parte helicoidal da trajetória (linha branca) ocorre onde a ferramenta maior já havia removido o material (linha verde). Assim, explica-se o tempo mais longo correspondente a esse tipo de movimentação na trajetória do NX. Uma pesquisa mais detalhada poderia determinar se esse é um erro no algoritmo de geração de trajetórias do NX, ou se foi utilizado um valor errado em um de seus parâmetros.

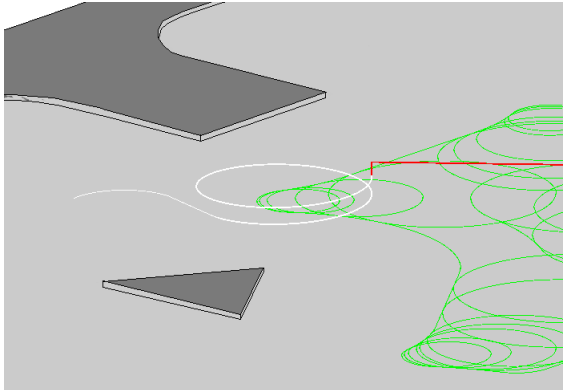


Figura 5.5. Erro na trajetória gerada com o software NX. Fonte: elaboração própria.

### 5.1.3 Análise dos tempos da ferramenta diâmetro 10 mm

Na figura 5.6 é apresentado um gráfico com um detalhamento dos tempos usados pela máquina na execução das trajetórias da ferramenta de diâmetro 10 mm, geradas pelos softwares OC2PATH e NX.

Os comprimentos totais das trajetórias foram de 22,3m para a trajetória gerada por o software OC2PATH e 13,6m para a gerada pelo software NX (sem as movimentações de reposicionamento rápido).

As trajetórias da ferramenta de 10 mm limitam-se à remoção de material nos cantos da cavidade, onde as ferramentas de maior diâmetro não conseguem entrar. Neste caso são as trajetórias com os tempos mais curtos. Percebe-se que novamente os tempos da trajetória gerada pelo software OC2PATH são maiores do que aqueles do software NX. Com a mudança dos avanços de reposicionamento no comando G00 para 10.000 mm/min os tempos para estas movimentações seriam 10 segundos para a trajetória gerada pelo OC2PATH e 3,6 segundos para a trajetória gerada com o NX.

Além disso, é maior o tempo das movimentações com o comando G01 na trajetória gerada pelo OC2PATH em comparação com o NX. Isto ocorre porque nessas trajetórias cada canto é percorrido várias vezes pela ferramenta, conectando cada arco com linhas retas, como foi mencionado no capítulo 3.

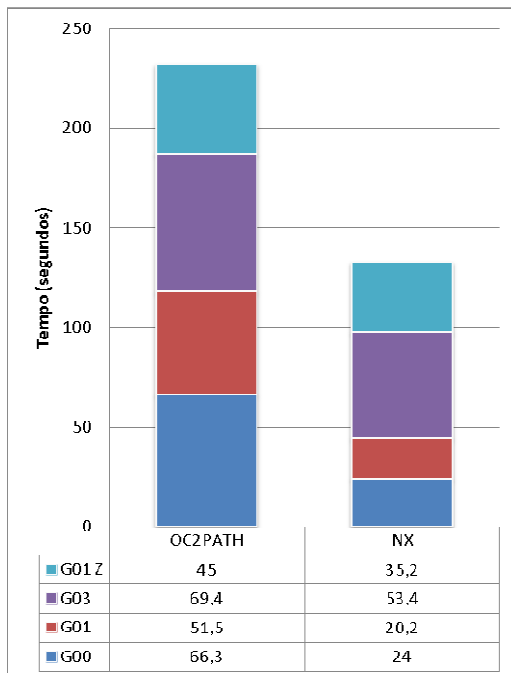


Figura 5.6. Detalhamento dos tempos de usinagem da ferramenta de diâmetro 10 mm. Fonte: elaboração Própria.

#### 5.1.4 Operação de pré-acabamento

No caso da cavidade usinada com a trajetória gerada pelo software OC2PATH, foi preciso fazer uma operação adicional de pré-acabamento. Esta operação foi necessária porque as paredes da cavidade ficaram com pequenas protuberâncias, uma vez que todas as movimentações de corte são feitas com interpolações circulares (Figura 5.7).

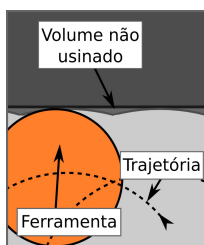


Figura 5.7. Volume não usinado pelo código gerado com o software OC2PATH.

Para essa operação de pré-acabamento foi programada uma trajetória paralela ao contorno da cavidade usando-se a ferramenta de diâmetro 20 mm.

### 5.1.5 Análise dos tempos das ferramentas combinadas

Na figura 5.8 são apresentados os tempos na máquina para cada tipo de movimentação nas operações de usinagem com as diferentes ferramentas, tanto para a trajetória gerada pelo software OC2PATH como a gerada pelo software NX. O tempo da operação de pré-acabamento é apresentado em uma categoria própria, chamada de PREACAB.

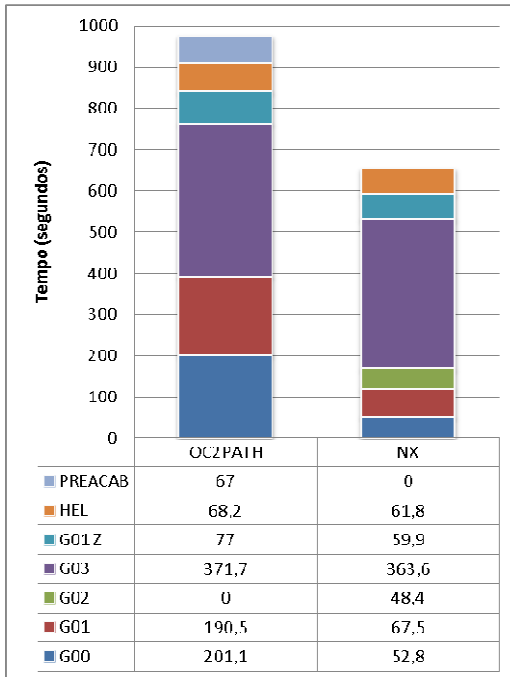


Figura 5.8. Detalhamento dos tempos de usinagem de todas as ferramentas.

Fonte: elaboração própria.

Na figura 5.9 é apresentado um gráfico dos tempos de usinagem de todas as ferramentas, mas utilizando os tempos de movimentações rápidas calculados, isto é, caso o comando G00 (com avanço máximo da máquina) pudesse ter sido utilizado.

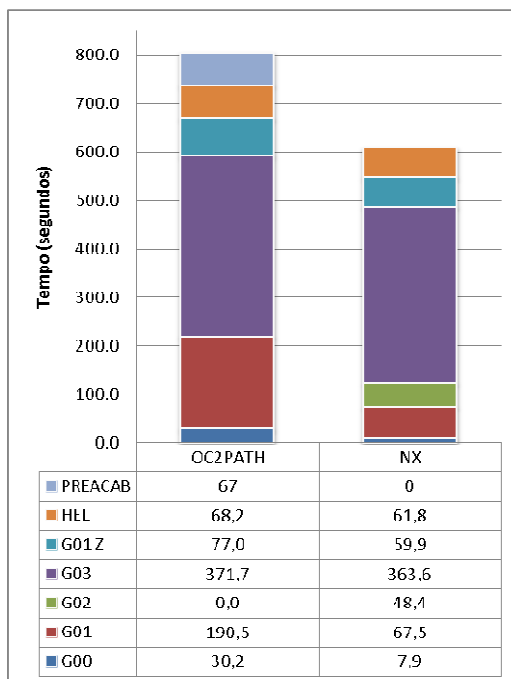


Figura 5.9. Detalhamento dos tempos de usinagem de todas as ferramentas, utilizando um avanço de 10.000 mm/min para o comando G00. Fonte: elaboração própria.

## 5.2 ANÁLISE DA DEMANDA DE POTÊNCIA

Conforme exposto no capítulo 2, uma estimativa da potência de corte utilizada em uma operação de usinagem é obtida como o resultado do produto da taxa de remoção de material com a potência unitária de corte. Também foi apresentado como a taxa de remoção de material ( $Q$ ) é calculada como um produto dos parâmetros de operação  $a_p$ ,  $a_e$  e  $V_f$ . Portanto, enquanto a potência unitária e os parâmetros de operação  $a_p$  e  $V_f$  sejam mantidos constantes, pode-se estabelecer uma relação entre a potência e as variações da profundidade axial  $a_p$ . Assim, uma trajetória que apresente uma utilização constante da potência ao longo da trajetória é considerada melhor, porque os outros parâmetros  $a_p$  e  $V_f$  podem ser incrementados para uma maior taxa de remoção de material.

Existem diferentes métodos que podem ser utilizados para medir a potência em um sistema eletromecânico como o motor de uma fresadora CNC. Dentre as opções tem-se: (a) medição das deformações elásticas de elementos mecânicos em movimento (neste caso o eixo do

motor ou da fresa); (b) medição da potência elétrica utilizada pelo motor que produz o movimento de giro da ferramenta; (c) leitura que o CNC faz da potência do motor. Neste trabalho optou-se pelo terceiro método listado acima, visando aproveitar a instrumentação já existente na fresadora CNC. Para gerar os gráficos apresentados foi utilizado o método descrito no Apêndice C. Como a cavidade considerada foi usinada mediante a repetição da mesma trajetória em diferentes níveis do eixo z, verificou-se que o gráfico de demanda de potência foi similar para cada um deles e, portanto, para cada trajetória/ferramenta somente são apresentados os gráficos de um dos níveis.

Embora este método para obter a leitura da potência tenha sido utilizado, o mesmo possui as seguintes limitações: (a) a resolução do indicador de potência elétrica (*load*) do CNC não apresenta incrementos menores do que 1% da potência; (b) as potências são apresentadas como porcentagem de uma potência máxima da máquina, e não como um valor absoluto. Contudo, como será apresentado, com os valores de potência obtidos chegou-se a conclusões interessantes decorrentes da comparação dos gráficos.

### 5.2.1 Operações com a ferramenta de diâmetro 40 mm

Nas figuras 5.10 e 5.11 são apresentados os gráficos de utilização de potência indicada pelo CNC ao longo do fresamento de um dos níveis da cavidade.

Na tabela 5.1 é mostrada uma comparação das potências, segundo o tipo de movimentação das trajetórias que foram geradas para a ferramenta de diâmetro 40 mm.

É importante aqui fazer considerações da trajetória gerada pelo NX:

- Mesmo que a estratégia de entrada selecionada na geração da trajetória tenha sido a helicoidal, o software NX gerou uma entrada em rampa, paralela ao contorno. Esta trajetória exige uma demanda maior de potência na operação.
- A trajetória gerada pelo NX incluiu movimentações rápidas que removeram material. Com o pós-processador modificado essas movimentações mudaram para movimentações tipo G01 com velocidade de avanço  $V_f = 1500$  mm/min. Este fato não foi percebido até depois de usinar a cavidade, e este erro possivelmente foi causado pela utilização de um parâmetro errado. Mesmo assim, com a utilização desse avanço para as



movimentações rápidas, a cavidade foi usinada sem problemas, mas a potência máxima utilizada foi mais elevada (14%).

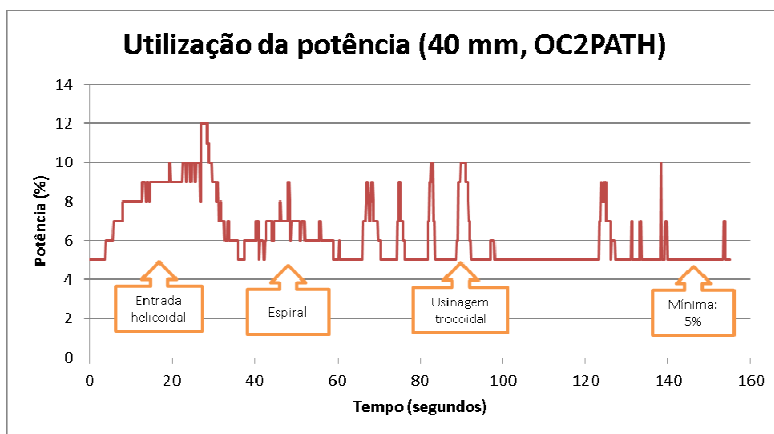


Figura 5.10. Potência ao longo do tempo de usinagem da ferramenta de diâmetro 40 mm, com a trajetória gerada pelo software OC2PATH. Fonte: elaboração própria.

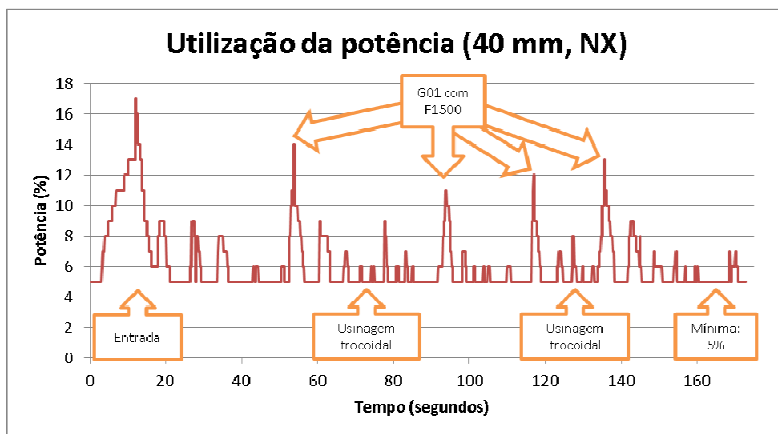


Figura 5.11. Potência ao longo do tempo de usinagem da ferramenta de diâmetro 40 mm, com a trajetória gerada pelo software NX. Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.1. Potências máximas encontradas nos usinagens da ferramenta de diâmetro 40 mm. Fonte: elaboração própria.

Tipo de operação	Algoritmo de geração de trajetórias	
	OC2PATH	NX
Potência usada sem usinagem	5%	5%
Entrada	12% máximo	17% máximo
Espiral	9% máximo	--
Lineal (G01)	--	14% máximo
Trocoidal (G03)	10% máximo	9% máximo

### 5.2.2 Operações com a ferramenta de diâmetro 20 mm

Nas figuras 5.12 e 5.13 são apresentados os gráficos de utilização de potência apontada pelo CNC ao longo do fresamento de um dos níveis.

Na tabela 5.2 é apresentada uma comparação das potências, de acordo com o tipo de movimentação das trajetórias que foram utilizadas com a ferramenta de diâmetro 20 mm.

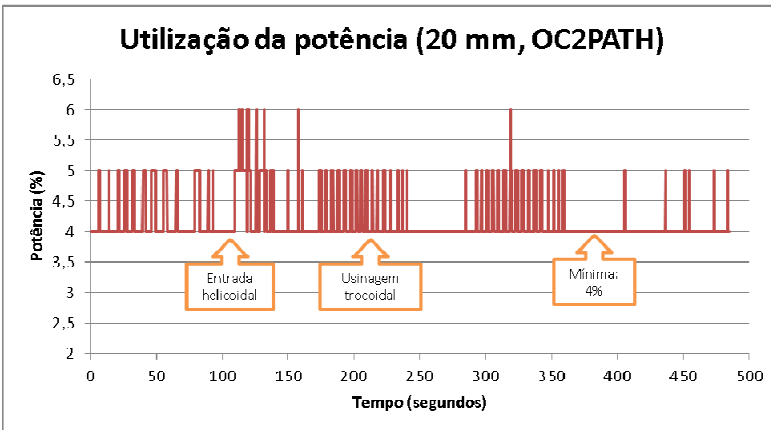


Figura 5.12. Potência ao longo do tempo de usinagem da ferramenta de diâmetro 20 mm, com a trajetória gerada pelo software OC2PATH. Fonte: elaboração própria.

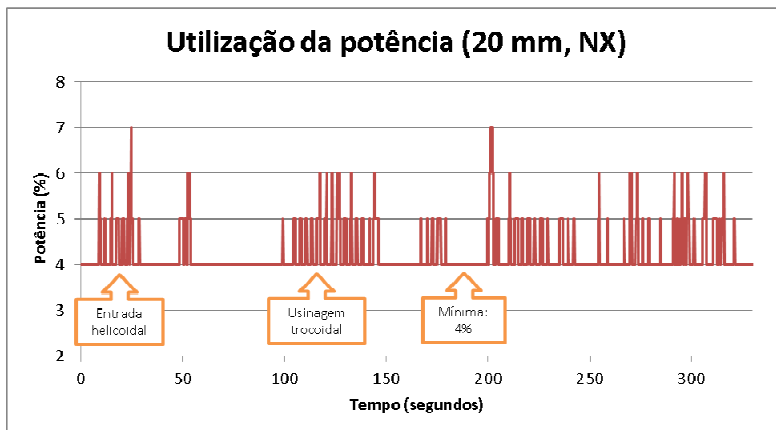


Figura 5.13. Potência ao longo do tempo de usinagem da ferramenta de diâmetro 20 mm, com a trajetória gerada pelo software NX. Fonte: elaboração própria.

A trajetória gerada pelo software NX gerou para esta ferramenta duas entradas helicoidais onde o material havia sido removido anteriormente pela ferramenta de diâmetro 40 mm, e por isso o gráfico inclui tempos em que a potência é mantida em 4%. A inclusão dessas entradas não necessárias é considerada como um erro na trajetória gerada pelo software NX, e se elas não estivessem no código gerado o tempo de operação seria menor para essa trajetória.

Tabela 5.2. Potências máximas encontradas nos usinagens da ferramenta de diâmetro 20 mm. Fonte: elaboração própria.

Tipo de operação	Algoritmo de geração de trajetórias	
	OC2PATH	NX
Potência usada sem usinagem	4%	4%
Entrada helicoidal	6% máximo	7% máximo
Trocoidal (G03)	6% máximo	6% máximo

### 5.2.3 Operações com a ferramenta de diâmetro 10 mm e pré-acabamento com 20 mm

Tanto as operações que utilizaram a ferramenta de diâmetro 10 mm quanto a operação de pré-acabamento feita com a ferramenta de 20 mm não provocaram mudança na leitura da potência mostrada na tela do controle, isto é, a tela mostrou uma potência constante de 4% ao longo de toda a operação. Estima-se então que a utilização de potência foi

pequena e, portanto, a avaliação da potência usando esse método não é factível.

#### 5.4 CONCLUSÕES DOS TESTES DE USINAGEM

Para a avaliação das trajetórias foram apresentados dois métodos diferentes, que são considerados complementares. Das trajetórias apresentadas neste trabalho, também ao tempo de usinagem, aquela gerada pelo software NX resulta em um comprimento de usinagem menor, e conseqüente o tempo de usinagem também é menor. Por outro lado, pode-se afirmar que a trajetória gerada com o NX tem pontos onde a potência requerida é maior. Assim, no caso da trajetória gerada com o OC2PATH, uma menor incidência de pontos críticos (isto é, de alta demanda de potência) pode permitir um aumento maior dos parâmetros de avanço ( $V_f$ ) e a profundidade axial ( $a_p$ ), visando aproveitar a disponibilidade de potência da máquina.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um método computacional para gerar trajetórias trocoidais e espirais combinadas para fresamento de cavidades (OC2PATH), sua aplicação numa cavidade 2,5D complexa, e a utilização de procedimentos para a avaliação da trajetória gerada tanto com o método proposto como usando-se um software comercial.

O método proposto gera trajetórias para o fresamento, porém a maior parte das trajetórias obtidas tem um comprimento maior (e portanto são mais demoradas) que as geradas com o software comercial. A diferença de comprimento nas trajetórias é causada principalmente por três fatores:

- no caso da trajetória gerada pelo software comercial, foram usados segmentos de reta de usinagem nas trajetórias, em comparação com uma trajetória puramente trocoidal gerada pelo OC2PATH. Esses segmentos retos são equivalentes a segmentos de trajetórias do tipo paralelas ao contorno. A trajetória gerada pelo software comercial é então uma trajetória que combina a estratégia paralela ao contorno com a utilização de trajetória trocoidal nos cantos e regiões estreitas.
- falta de otimização da sequência das movimentações de avanço visando minimizar o número e o comprimento das movimentações de reposicionamento.
- as possibilidades referentes à operação de pré-acabamento precisam ser estudadas, já que é uma operação que demanda tempo, porém remove pouco material. Por um lado, ela poderia não ser necessária se o processo de acabamento tivesse capacidade de remover o material restante. Porém, outra possibilidade consiste em reduzir a área usinada com a trajetória trocoidal (diminuindo o tempo utilizado por essa operação) e efetuar o pré-acabamento com uma taxa de remoção maior.

Além do maior comprimento das trajetórias obtidas, foi observado que, enquanto as ferramentas utilizadas não atingem um nível de desgaste maior do que o recomendado pela bibliografia, a demanda de potência tem mais pontos críticos (isto é, pontos com alta demanda de potência) nas trajetórias geradas pelo software comercial em comparação com as trajetórias geradas pelo OC2PATH. Essa diferença permite, em teoria, a utilização de valores maiores nos parâmetros do processo ( $v_f$ ,  $a_p$ ,  $a_e$ ) visando um maior aproveitamento da potência disponível. Porém, essa possibilidade terá que ser avaliada com experimentos futuros.

## 6.1 RECOMENDAÇÕES REFERENTES AO MÉTODO DE GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS

O maior comprimento da trajetória gerada pelo OC2PATH é uma das principais desvantagens do método proposto, considerando-se o que usando-se as mesmas velocidades de avanço os tempos do usinagem são mais longos. Para gerar trajetórias mais curtas recomenda-se estudar a possibilidade de trabalhar com trajetórias com estratégias combinadas, similares às utilizadas pelo software comercial ou aos métodos propostos por Ibaraki, Yamaji e Matsubara (2010) ou Xiong, Zhuang e Ding (2011), com o intuito de diminuir a quantidade e comprimento das movimentações de reposicionamento das ferramentas.

Também se recomenda utilizar uma otimização do tipo caixeiro viajante para a procura de uma sequência otimizada das movimentações de usinagem, minimizando as movimentações de reposicionamento. Esta idéia foi apresentada por Castelino, D'Souza e Wright (2003).

Outra recomendação é a inclusão, no processo de geração de trajetórias, do cálculo dos valores da taxa de remoção do material. Esses valores poderiam ser utilizados para que diferentes avanços pudessem ser utilizados ao longo do processo, e poder-se-ia comparar os valores teóricos de potência com a potência obtida experimentalmente.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES REFERENTES AO FRESAMENTO TROCIDAL

A obtenção de parâmetros de corte otimizados para o fresamento trocoidal é um problema complexo, e precisa ser estudado mais detalhadamente. Por exemplo, utilizando-se menos potência é possível aumentar a taxa de remoção de material incrementando tanto o valor da velocidade do avanço ( $v_f$ ), como a profundidade de corte ( $a_p$ ). Entretanto, quais são as implicações de se incrementar uma ou outra variável? Existem muitas pesquisas relacionadas à seleção dos parâmetros de corte, porém poucas delas apresentam resultados específicos para processos de fresamento trocoidal. Os métodos de avaliação apresentados neste trabalho (captura e análise da potência utilizada ao longo da operação, detalhamento dos tempos, medição do desgaste da ferramenta) poderiam ser utilizados também para a seleção dos parâmetros de corte.

## 6.3 RECOMENDAÇÕES REFERENTES À AVALIAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS

O primeiro passo utilizado no processo de avaliação das trajetórias foi a simulação mediante programas computacionais. Porém, tais programas são essencialmente ferramentas que mostram na tela as movimentações da máquina, permitindo ao usuário fazer uma avaliação

das trajetórias, mas sem fazer nenhuma análise além do cálculo do tempo de fresamento. A utilização de software para obter automaticamente do código o detalhamento dos tempos utilizados ou um gráfico da taxa de remoção de material ( $Q$ ), por exemplo, poderia ajudar em desenvolvimentos semelhantes ao apresentado nesta dissertação. Embora existam softwares comerciais que têm a capacidade de fazer esse tipo de cálculo (um exemplo deles é o Vericut®, <http://www.cgtech.com/>), um sistema assim também poderia ser desenvolvido.

Uma limitação importante do método apresentado para gerar os gráficos de potência do fuso principal é a baixa sensibilidade da medição que é apresentada na tela do CNC. Para evitar essa limitação, pode ser utilizada no futuro uma medição da potência elétrica utilizada pelo motor do fuso.

Apesar do método apresentado neste trabalho ter as limitações mostradas, pretende-se continuar o seu desenvolvimento tanto para melhorar seu desempenho com as trajetórias trocoidais como para explorar a geração de trajetórias de outros tipos. Pretende-se também disponibilizá-lo para uso via Internet, de maneira que ele possa ser utilizado por um grande número de pessoas.





## REFERÊNCIAS

- BAE, S.; KO, K.; KIM, B. H.; CHOI, B. K. Automatic feedrate adjustment for pocket machining **Computer-Aided Design**, 35 (5) *April*, 495-500. 2003.
- BANERJEE, A.; FENG, H.-Y.; BORDATCHEV, E. V. Process planning for corner machining based on a looping tool path strategy **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, 225, 1578-1590. 2011.
- BOOGERT, R. M.; KALS, H. J. J.; VAN HOUTEN, F. J. A. M. Tool paths and cutting technology in computer-aided process planning **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, *Springer London*, 11, 186-197. 1996.
- BOUARD, M.; PATELOUP, V.; ARMAND, P. Pocketing toolpath computation using an optimization method **Computer-Aided Design**, 43, 1099 - 1109. 2011.
- CASTELINO, K.; D'SOUZA, R.; WRIGHT, P. K. Toolpath optimization for minimizing airtime during machining **Journal of Manufacturing Systems**, 22, 173 - 180. 2003.
- 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**, 43, 651 - 663. 2011.
- CHOI, H. I.; CHOI, S. W.; MOON, H. P.; WEE, N.-S. New algorithm for medial axis transform of plane domain **Graph. Models Image Process., Academic Press, Inc.**, 59, 463-483. 1997.
- CHOY, H.; CHAN, K. Modeling Cutter Swept Angle at Cornering Cut **International Journal of CAD/CAM**, 3, 1-19. 2003.
- CHOY, H.; CHAN, K. A corner-looping based tool path for pocket milling **Computer-Aided Design**, 35, 155 - 166. 2003.
- COSTA, A. R. **Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Insertos Intercambiáveis**, Dissertação de Mestrado, *Universidade Estadual de Campinas*, 2003. 2003.
- COSTA DE OLIVEIRA, L.; TSUZUKI, M. Optimization of the 2 1/2 D Pocket Machining Using Multiple Tools. **Advanced Materials Research**, 223, 918-927. 2011.

CULVER, T.; KEYSER, J.; MANOCHA, D. Exact computation of the medial axis of a polyhedron **Computer Aided Geometric Design**, *21*, 65 - 98. 2004.

ELBER, G.; COHEN, E.; DRAKE, S. MATHSM: medial axis transform toward high speed machining of pockets **Computer-Aided Design**, *37*, 241 - 250. 2004.

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.

HATNA, A.; GRIEVE, R.; BROOMHEAD, P. Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues **Computer Integrated Manufacturing Systems**, *11*, 309 - 330. 1998.

HELD, M. VRONI: An engineering approach to the reliable and efficient computation of Voronoi diagrams of points and line segments **Computational Geometry**, *18*, 95 - 123. 2001.

HELD, M.; SPIELBERGER, C. A smooth spiral tool path for high speed machining of 2D pockets **Computer-Aided Design**, *41*, 539 - 550. 2009.

HINDUJA, S.; MA, Y. S.; BARROW, G. Determination of the radial width of cut and cutting modes in milling **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, *35*, 689-699. 1995.

HINDUJA, S.; SANDIFORD, D. An Optimum Two-tool Solution for Milling 2½D Features from Technological and Geometric Viewpoints **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, *53*, 77 - 80. 2004.

HINDUJA, S.; MANSOR, M. S. A.; OWODUNNI, O. O. Voronoi-diagram-based linking of contour-parallel tool paths for two-and-a-half-dimensional closed-pocket machining **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, *224*, 1329-1350. 2010.

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

KIM, H.-C. Tool path generation and modification for constant cutting forces in direction parallel milling **The International Journal of**

**Advanced Manufacturing Technology, Springer London, 52, 937-947. 2011.**

KYOCERA. **Ferramentas de Corte. 2010**

LAMBREGTS, C.; DELBRESSINE, F.; DE VRIES, W.; VAN DER WOLF, A. An efficient automatic tool path generator for 212D free-form pockets **Computers in Industry, 29, 151 - 157. 1996.**

LEE, D. T. Medial Axis Transformation of a Planar Shape **Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, PAMI-4, 363 -369. 1982.**

NARAYANASWAMI, R.; CHOI, Y. NC Machining of Freeform Pockets with Arbitrary Wall Geometry Using a Grid-Based Navigation Approach **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer London, 18, 708-716. 2001.**

OTKUR, M.; LAZOGLU, I. Trochoidal milling **International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, 1324 - 1332. 2007.**

PATELOUP, V.; DUC, E.; RAY, P. Bspline approximation of circle arc and straight line for pocket machining **Computer-Aided Design, 42, 817 - 827. 2010.**

RAMAMURTHY, R.; FAROUKI, R. T. Voronoi diagram and medial axis algorithm for planar domains with curved boundaries I. **Theoretical foundations Journal of Computational and Applied Mathematics, 102, 119 - 141. 1999.**

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, 49, 375 - 383. 2009.**

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

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

STEMMER, CASPAR ERICH. **Ferramentas de corte I, Ed. da UFSC, Florianópolis S.C. 1995.**

VEERAMANI, D.; GAU, Y.-S. Cutter-path generation using multiple cutting-tool sizes for 2-1/2D pocket machining **IIE Transactions, 32, 661-675. 2000.**

WANG, L.; CAO, J. A look-ahead and adaptive speed control algorithm for high-speed CNC equipment **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, *Springer-Verlag*, 63, 705-717. 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**, 225, 483-495. 2011.

YAO, Z.; GUPTA, S. K.; NAU, D. S. A Geometric Algorithm for Finding the Largest Milling Cutter **Journal of Manufacturing Processes**, 3, 1 - 16. 2001.

YINGJIE, Z.; YUNLONG, L. New Approach to Selecting Multiple Tools for Milling 2.5-D Pockets **Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on**, 2320 -2325. 2007.

## APÊNDICE A - Vetorização na linguagem Octave

Na linguagem Octave a alocação e chamada repetida de funções são lentas e, portanto, em geral a utilização de ciclos (“loops”) FOR (por exemplo) faz com que a execução do código demore sobremaneira. Assim, a vetorização consiste em colocar os valores aos quais vai ser aplicada uma operação em um vetor, e chamar uma função ou operação somente uma vez, para todo o vetor.

Como exemplo, considere o seguinte ciclo sobre duas variáveis:

```
for i=1:400
  for j=1:200
    distancia(i, j) = sqrt( ( y(i, j) - py )^2 + ( x(i, j) - px )^2 )
  end for
endfor
```

Consegue-se calcular este ciclo usando somente uma linha (mostrada abaixo), e nesse caso o tempo de execução será mais curto:

```
distancia = sqrt( ( y - py )^2 + ( x - px )^2 )
```

O intérprete da linguagem consegue automaticamente aplicar as operações levando em consideração cada um dos tamanhos dos arranjos.

Além do mais, o intérprete pode facilmente modificar valores da matriz com base em uma condição. Por exemplo, o pseudocódigo:

```
for i=1:400
  for j=1:200
    if (x<50) distancia(i, j)=sqrt((y(i, j) - py)^2 + (x(i, j) - px)^2)
  end for
endfor
```

Pode ser escrito da forma:

```
filtro = find( x < 50 )
distancia(filtro) = sqrt( ( y(filtro) - py )^2 + ( x(filtro) - px )^2 )
```

Neste exemplo os índices que identificam aos valores de x que são menores que 50 são colocados na variável filtro e depois utilizados para selecionar os itens de distância, y e x, que serão utilizados na operação.

## APÊNDICE B - Geração de trajetórias com o UGS NX®

Com o intuito de se efetuar uma avaliação das trajetórias geradas pelo algoritmo proposto, foi utilizado o programa computacional comercial UGS NX® para fins de comparação. Assim, considera-se importante mostrar neste trabalho como e quais trajetórias são geradas neste software comercial, para que os resultados possam ser reproduzidos em trabalhos futuros.

Utilizou-se a versão 7.5.0.32 do programa UGS NX®, disponível no laboratório GRIMA da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Nesse programa foram utilizados tanto o módulo para projeto de peças (CAD – *Computer-Aided Design*) como o módulo de fabricação (CAM – *Computer-Aided Manufacturing*).

### Projeto da cavidade

A cavidade foi projetada utilizando o módulo CAD do programa UGS NX. Começando com um esboço retangular de 150x200 mm, foi criada uma extrusão representando o bloco de matéria-prima. Depois foi criado mais um esboço com a forma da cavidade, conforme mostrado na figura B.1. Além das dimensões apresentadas no desenho da cavidade, o esboço inclui os arredondamentos dos cantos (que não estão especificados na figura).

Com esse esboço também foi feita uma outra extrusão, mas agora fazendo uma subtração do material original e, portanto, gerando a cavidade. Uma representação da peça com a cavidade é mostrada na figura B.2.

### Geração das trajetórias

O modelo da cavidade projetada inclui as informações da geometria final da peça, e para fabricar a referida cavidade serão necessários muitos outros parâmetros e variáveis para definir o processo. Como pode-se perceber neste trabalho, existem para a geração das trajetórias muitas outras variáveis além dos parâmetros apresentados no Capítulo referente à parte experimental do trabalho que vão modificar a trajetória final da ferramenta. No entanto, é difícil conhecer com a profundidade suficiente um programa computacional alheio para selecionar os parâmetros ótimos para a geração da trajetória. Assim, os parâmetros apresentados aqui representam por um lado uma escolha baseada nas informações do fabricante das ferramentas, mas também nas escolhas utilizadas para a experimentação com o código gerado com OC2PATH. Sem dúvida a escolha pode ser melhorada por meio do

conhecimento do funcionamento do programa NX referente às ferramentas e ao processo.

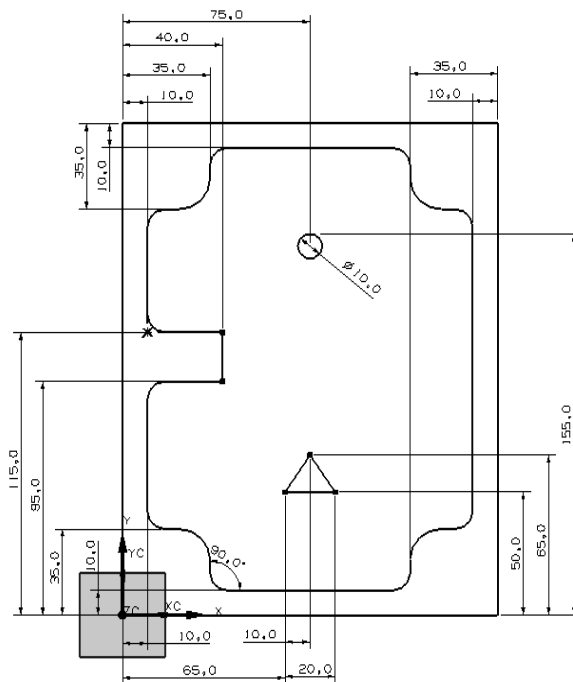


Figura B.1. Cavidade contendo ilhas, que foi criada usando-se o programa UGS NX©- vista superior

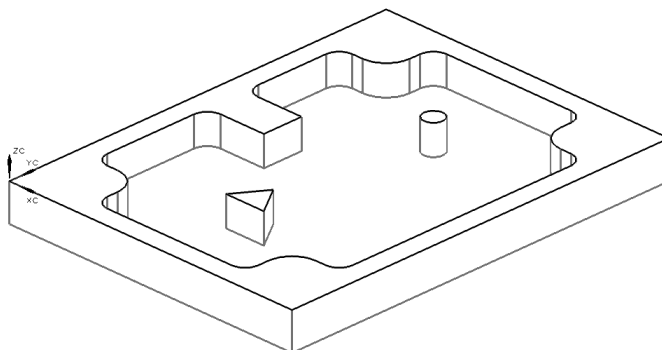


Figura B.2. Cavidade contendo ilhas, que foi criada usando-se o programa UGS NX© - vista isométrica com linhas escondidas

O processo de geração de trajetórias no programa NX não é simples, e disponibiliza inúmeras opções. A determinação da área a ser usinada pode ser feita de diversas maneiras. O processo completo não é detalhado neste trabalho, sendo apresentados somente os parâmetros utilizados referentes à geração das trajetórias.

### Parâmetros comuns da trajetória trocoidal.

Foi utilizado o método chamado “MOLD\_ROUGH”, que é o padrão de corte “Trocoidal” para as três ferramentas. Os parâmetros usados para a geração da trajetória trocoidal são apresentados na figura B.3, da maneira como foram inseridos na respectiva janela do programa NX.

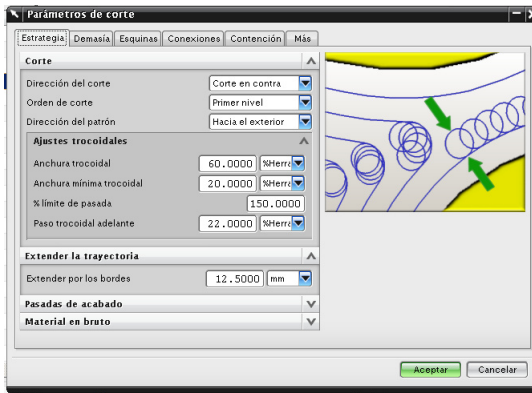


Figura B.3. Parâmetros usados para gerar a trajetória trocoidal no programa UGS NX

### Ferramenta de diâmetro 40 mm

Foram usados no programa NX os mesmos valores dos parâmetros de corte usados no método desenvolvido neste trabalho. Para a ferramenta (fresa) de diâmetro 40 mm são apresentadas na Figura B.4 as capturas de tela do NX. A figura B.5 contém uma representação gráfica da trajetória obtida.



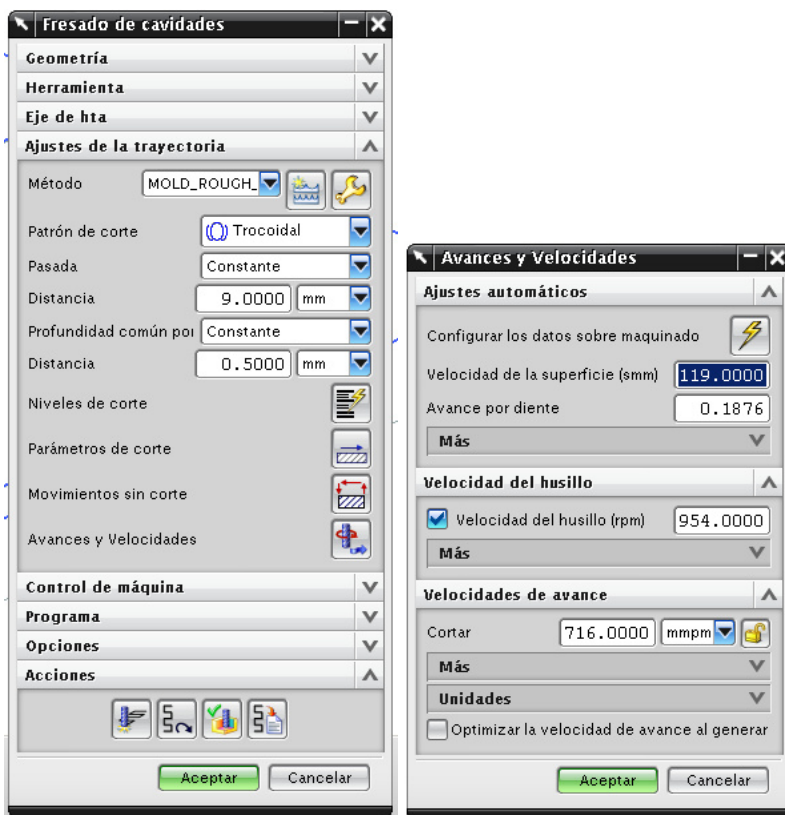


Figura B.4. Entrada de datos para o fresamento da cavidade com uma fresa de diâmetro 40 mm na tela do programa NX.

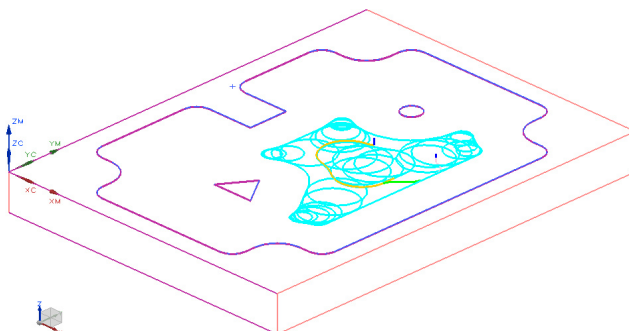


Figura B.5. Trajetória gerada pelo programa NX para a usinagem da cavidade usando-se uma fresa de 40 mm.

### Ferramenta de diâmetro 20 mm

Para a ferramenta de diâmetro 20 mm são apresentadas na Figura B.6 as capturas de tela do programa NX. A figura B.7 contém uma representação gráfica da trajetória gerada para a usinagem da cavidade usando-se uma fresa de 20 mm.

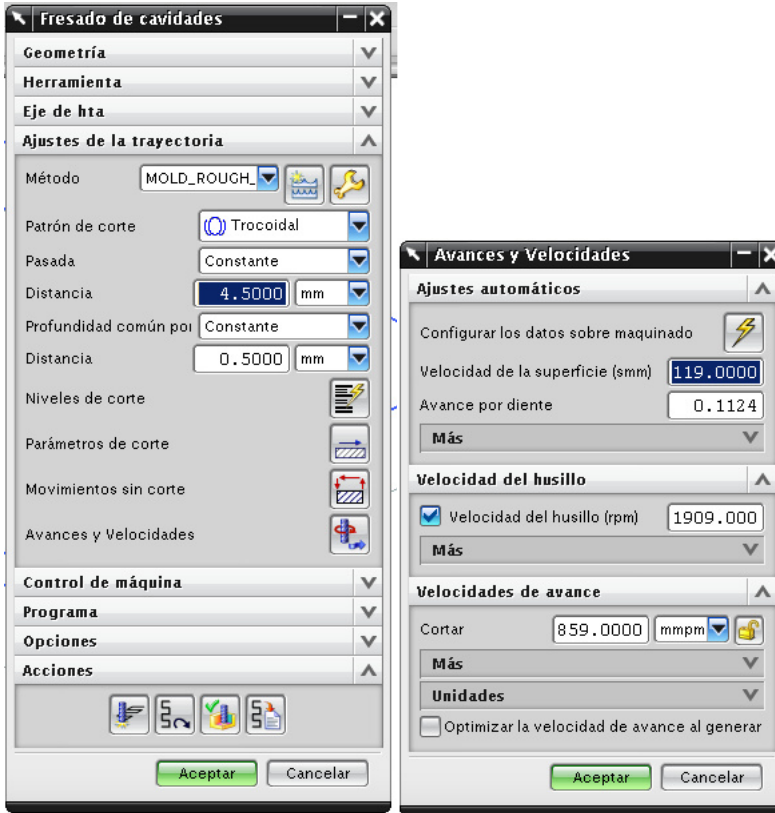


Figura B.6. Entrada de dados para o fresamento da cavidade com uma fresa de diâmetro 20 mm na tela do programa NX

### Ferramenta de diâmetro 10 mm

Para a ferramenta de diâmetro 10 mm são apresentadas na Figura B.8 as capturas de tela do programa NX. A figura B.9 contém uma representação gráfica da trajetória gerada para a usinagem da cavidade com a fresa de 10 mm.

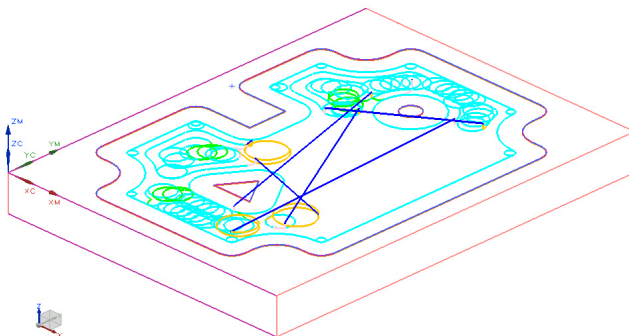


Figura B.7. Trajetória gerada pelo programa NX para a usinagem da cavidade usando-se uma fresa de 20 mm

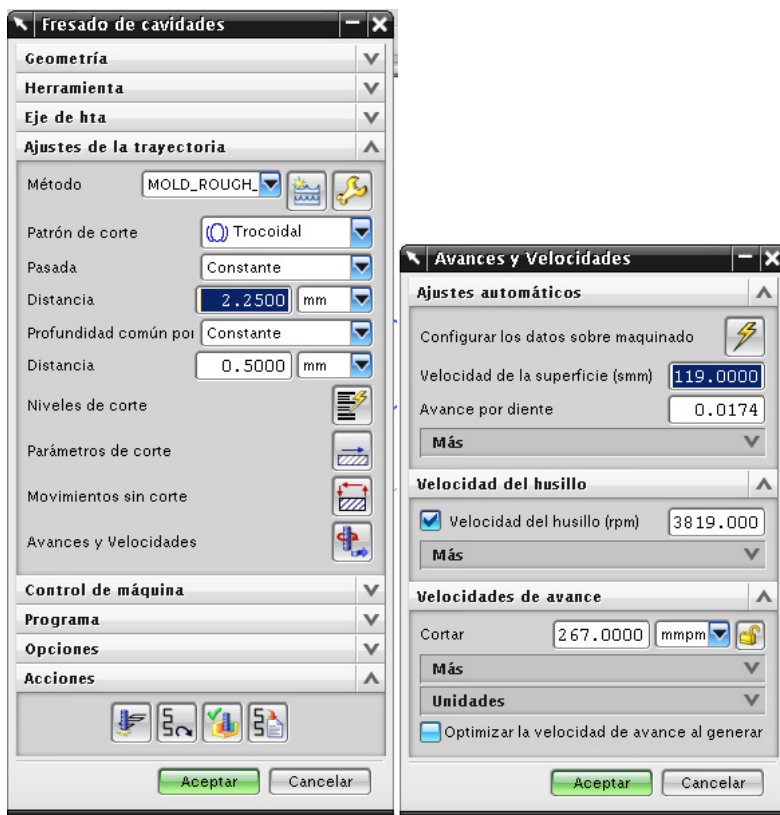


Figura B.8. Entrada de dados para o fresamento da cavidade com uma fresa de diâmetro 10 mm na tela do programa NX

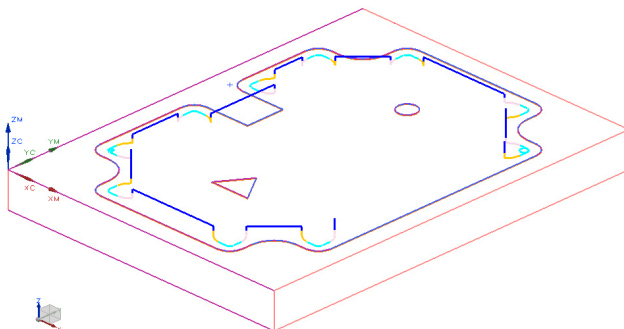


Figura B.9. Trajetória gerada pelo programa NX para a usinagem da cavidade usando-se uma fresa de 10 mm

### Pós-processamento da trajetória

Após ser gerada a trajetória, é preciso gerar o programa no código G (norma ISO 6983) para ser usado na fresadora. O software NX possui uma grande variedade de pós-processadores que permitem gerar códigos para controladores específicos. Para esta pesquisa foi utilizado um pós-processador genérico para uma fresadora de três eixos. Foram feitas modificações simples para ajustá-lo à fresadora do laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON) da UFSC. Especificamente foram feitas as seguintes modificações: (a) foi trocado o comando “M03” pelo comando “M04” para ligar o motor de giro da ferramenta; (b) foi trocada a instrução “G00” pela sequência “G01 F1500”; (c) foi adicionado o código “F” (de atribuição de velocidade de avanço) a todas as linhas com instruções “G01”, “G02” e “G03”.

Como na trajetória gerada pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho o código foi gerado para a usinagem da cavidade considerou 0,5 mm de profundidade axial de corte (valor de  $a_p$ , segundo apontado no capítulo 4), foi preciso incluir linhas e modificar as coordenadas  $z$  do código G para utilizá-lo em toda a cavidade.

## **APÊNDICE C - Captura das informações da tela do CNC usando uma câmara de vídeo**

Para esta pesquisa foi desenvolvido um método para capturar informações apresentadas na tela do CNC Siemens Sinumerik 840Di. Por meio da descrição neste Apêndice do método implementado, o leitor poderá aplicá-lo em suas pesquisas, se houver necessidade.

### **Justificativa**

O presente método foi desenvolvido devido às seguintes razões:

- O desenvolvimento de uma instrumentação específica para a pesquisa levaria mais recursos e tempo.
- O mesmo método pode ser utilizado para diferentes informações disponíveis na tela, as quais podem ser associadas ao tempo e à instrução (na sequência do programa) que esteja sendo executada.
- Poder-se-ia efetuar a análise não automatizada dos vídeos, mas nesse caso o tempo para a obtenção dos resultados seria mais longo.

### **Gravação do vídeo**

Para que o método proposto possa ser utilizado, o posicionamento da câmara (Figura C.1) é muito importante. A câmara precisa ser posicionada na frente da tela do CNC de tal maneira que as informações de interesse sejam visíveis. É importante que não existam movimentos relativos entre a câmara e a tela do CNC, uma vez que provocariam o mau funcionamento do processo automatizado de extração das informações.

Para esta pesquisa foi gravado um vídeo abrangendo toda a tela do CNC com uma resolução de 640x480. A resolução de 320x240 foi testada também, mas não foi possível extrair as informações do CNC com esta resolução. A câmara utilizada foi uma Canon PowerShot SX30IS.

### **Extração das imagens do vídeo**

Depois de determinar um intervalo do tempo do vídeo que precisa ser analisado, são extraídas imagens do vídeo ao longo desse intervalo. Foi utilizado o programa `avconv` (que pode ser obtido na página <http://libav.org/>), aplicando-se o seguinte comando:

```
avconv -i <video> -vsync 1 -t <tempo> -ss <inicio> -r <fps> -an -y '%5d.png'
```

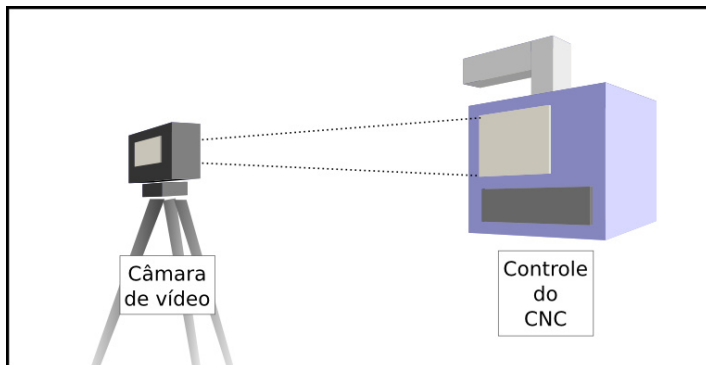


Figura C.1. Posicionamento da câmera de vídeo. Fonte: elaboração própria.

Os parâmetros utilizados no programa avconv são descritos na Tabela C.1.

Tabela C.1. Parâmetros do comando avconv. Fonte: elaboração própria.

<i>Descrição</i>	<i>Parâmetro</i>
Nome do vídeo	<video>
Tempo de início do intervalo de interesse (seg)	<inicio>
Largura do intervalo de interesse (seg)	<tempo>
Número de quadros por segundo (1/seg)	<fps>

Esse comando produz uma série de arquivos de imagens tipo png. Nesta pesquisa foram utilizados 10 quadros por segundo.

### **Seleção da área de interesse**

O próximo passo consiste em identificar nas imagens uma pequena área que contém a informação que vai ser extraída. A imagem obtida é então convertida para uma imagem em tons de preto. No caso desta pesquisa, por exemplo, foi extraída a informação da potência utilizada, como é mostrado na Figura C.2.

Para extrair essas imagens é utilizado o comando convert do programa imagemagick (que pode ser obtido na página <http://www.imagemagick.org/>) para cada uma das imagens:

```
convert <imagem> -crop <x>x<y>+<posx>+<posy> +repage -colorspace gray -level 0,81% <arquivo-saída>
```

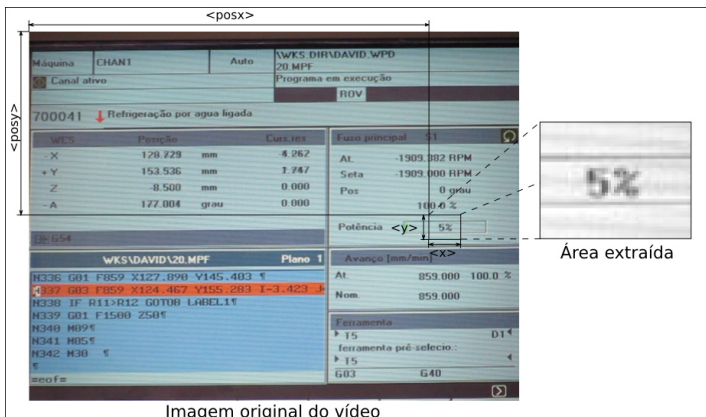


Figura C.2. Seleção da área de interesse no CNC. Fonte: elaboração própria.

Os parâmetros utilizados no comando convert são descritos na Tabela C.2.

Tabela C.2. Parâmetros do comando convert. Fonte: elaboração própria.

<i>Descrição</i>	<i>Parâmetro</i>
Nome da imagem	<imagem>
Tamanho da imagem na direção x ( <i>pixel</i> )	<x>
Tamanho da imagem na direção y ( <i>pixel</i> )	<y>
Posição x do canto superior esquerdo ( <i>pixel</i> )	<posx>
Posição y do canto superior esquerdo ( <i>pixel</i> )	<posy>
Nome do arquivo de saída	<arquivo-saida>

### **Automatização da leitura dos dados**

Para a leitura e armazenamento dos dados foi utilizado o programa Octave. Ele pode carregar as imagens e interpretá-las como uma matriz, onde para cada tom de preto é associado um valor numérico.

O método utilizado para identificar cada um dos valores é o seguinte: primeiramente a imagem é carregada numa matriz. Esta matriz é comparada com as imagens que foram identificadas anteriormente, e se for semelhante a uma delas é obtido o valor conhecido. Do contrário, a imagem é apresentada para o usuário e o valor é inserido por ele no computador.

A comparação das imagens é feita avaliando-se a subtração elemento a elemento da matriz, e depois procura-se o elemento com a

maior diferença. Detecta-se assim a mudança de um ou vários pixels (Figura C.3).

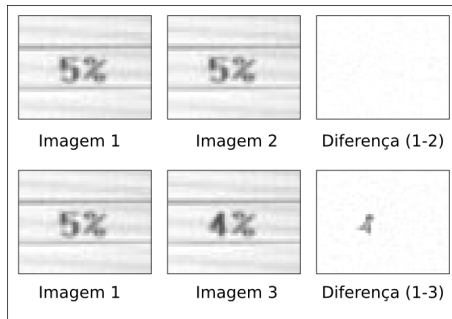


Figura C.3. Diferença calculada entre as imagens da área de interesse. Fonte: elaboração própria.

A saída deste processo contém um conjunto de valores da potência. Como as imagens foram obtidas do vídeo utilizando-se um intervalo regular de tempo entre elas, pode-se gerar gráficos da potência em função do tempo.



### APÊNDICE D – Exemplo de código gerado

Na tabela D.1 é apresentado um exemplo do código gerado com o método proposto.

Tabela D.1. Exemplo do código gerado.

<b>Código</b>	<b>Descrição</b>
N00005 G54 G17 G90 G71 G21	Cabeçalho
N00010 T07 D1 N00020 M06	Seleção da ferramenta
N00030 S954 M04 N00040 M08	Início do fuso principal
N00100 G00 Z5.000 N00101 G00 X113.355 Y104.762 N00102 G00 Z0.500	Posicionamento inicial
N00103 G03 F286 X113.355 Y104.762 I-18.000 J0.00 Z-0.191 N00104 G03 F286 X113.355 Y104.762 I-18.000 J0.00 Z-0.500 N00105 G03 F716 X113.355 Y104.762 I-18.000 J0.000	Entrada helicoidal
N00106 G03 X74.035 Y104.762 I-19.660 J0.000 N00107 G03 X119.994 Y104.762 I22.979 J0.000 N00108 G03 X70.715 Y104.762 I-24.639 J0.000 N00109 G03 X119.994 Y104.762 I24.639 J0.000	Espiral
N00200 G01 F716 X85.250 Y125.752	Reposicionamento sem sair da cavidade
N00201 G03 F716 X83.442 Y84.118 I-1.808 J-20.778	Arco (usinagem trocoidal)
N00300 G01 F716 X64.408 Y103.781	Reposicionamento sem sair da cavidade
N00301 G03 F716 X74.583 Y85.476 I6.142 J-8.566	Arco (usinagem trocoidal)
N00400 G00 Z5.000 N00401 G00 X95.995 Y123.765 N00402 G00 Z0.500 N00403 G01 F71 Z-0.500	Reposicionamento rápido ( $z = 5 \text{ mm}$ )
N00404 G01 F716 X108.827 Y138.968 N00405 G03 F716 X108.262 Y139.428 I-0.214 J0.315	Arco (usinagem trocoidal)
...	Outros reposicionamentos / arcos
N01301 G03 F716 X60.821 Y110.685 I-8.578 J-6.200	Arco (usinagem trocoidal)
N01400 G00 Z50 N01401 M09 N01402 M05 N01403 M30	Fim do programa

## APÊNDICE E - Desgaste da ferramenta

Como foi apresentada no capítulo 2, a medição do desgaste de flanco é comumente utilizada para avaliar o desgaste da ferramenta. Assim, a ferramenta é descartada quando o desgaste atinge certo valor. No desenvolvimento dos experimentos desta pesquisa procurou-se trabalhar dentro dos limites normais de operação das ferramentas, sem atingir esses valores de desgaste. Portanto, as ferramentas foram avaliadas ao longo dos experimentos e encontrou-se que as ferramentas não apresentaram elevado desgaste. Nesta seção são apresentadas imagens do estado de um dos inserts para cada ferramenta ao final das operações (isto é, após ser alcançada a profundidade de 20 mm da cavidade).

### Ferramenta de 40 mm

Nas figuras E.1 e E.2 são apresentadas as fotografias do flanco principal, da face da ferramenta e dos gumes de um dos inserts utilizados na ferramenta de 40 mm para a usinagem da cavidade.

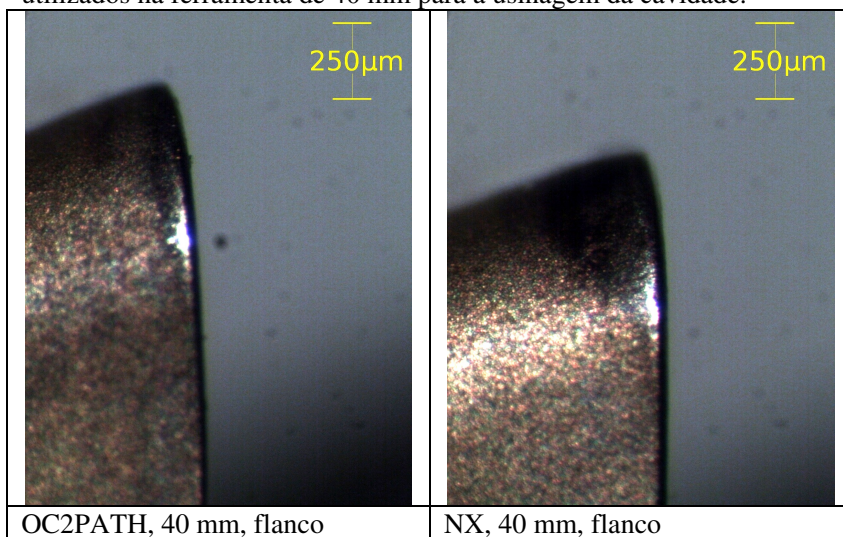


Figura E.1. Fotografias do flanco principal do inserto usado na ferramenta de diâmetro 40 mm. Fonte: elaboração própria.

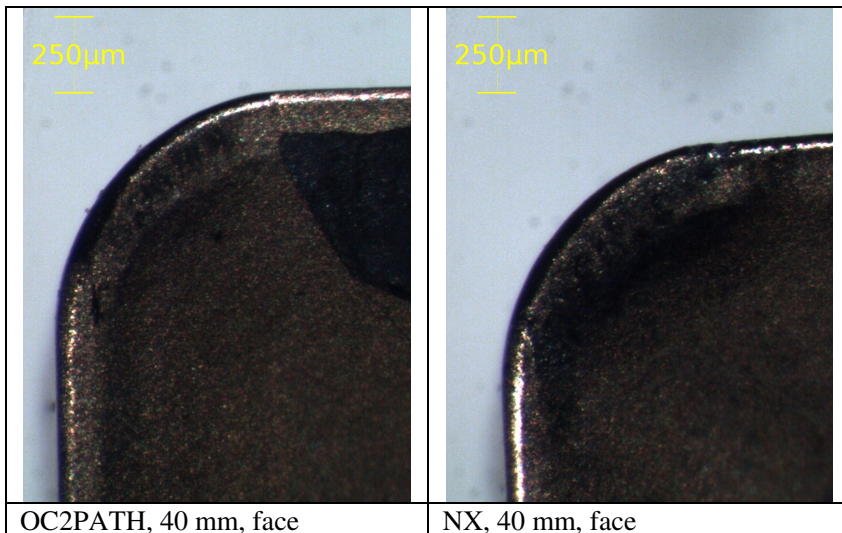


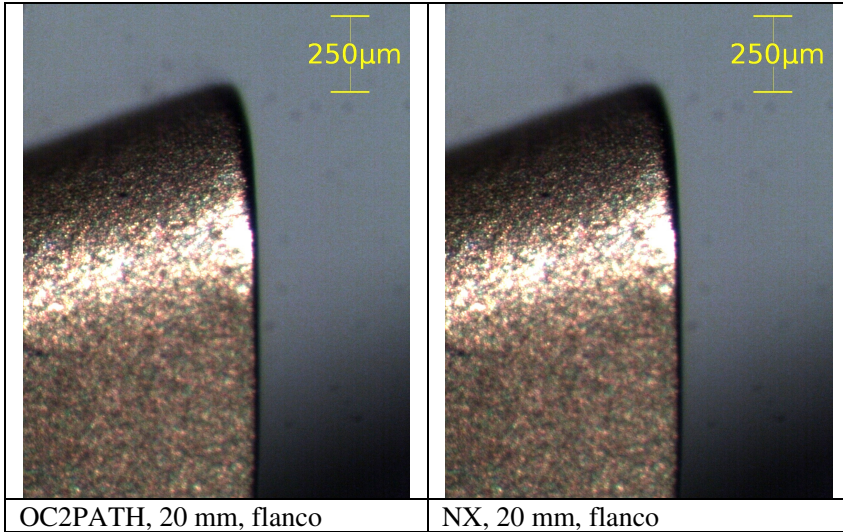
Figura E.2. Fotografias da face do inserto usado na ferramenta de diâmetro 40 mm. Fonte: elaboração própria.

Percebe-se que as ferramentas têm um desgaste reduzido (menos de  $50\mu\text{m}$ ), e que para as trajetórias geradas pelos softwares OC2PATH e NX o desgaste é similar.

### **Ferramenta de 20 mm**

Nas figuras E.3 e E.4 são apresentadas as fotografias do flanco principal, da face e dos gumes de um dos insertos utilizados na ferramenta de 20 mm para a usinagem da cavidade.

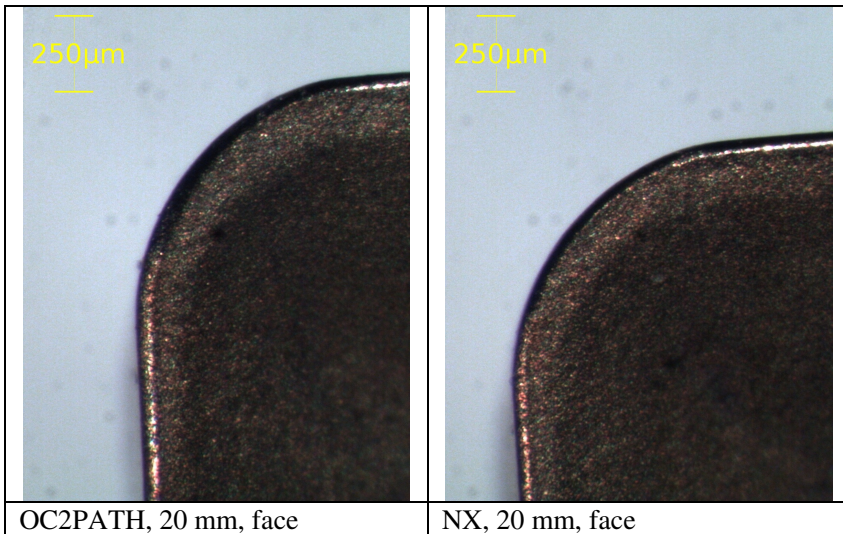
As fotografias mostram que os insertos utilizados com a ferramenta de diâmetro 20 mm apresentam um desgaste menor do que os insertos usados na ferramenta de 40 mm após completarem a usinagem de 20 mm de profundidade da cavidade. Novamente o desgaste causado pela usinagem para as duas trajetórias são similares.



OC2PATH, 20 mm, flanco

NX, 20 mm, flanco

Figura E.3. Fotografias do flanco principal do inserto usado na ferramenta de diâmetro 20 mm. Fonte: elaboração própria.



OC2PATH, 20 mm, face

NX, 20 mm, face

Figura E.4. Fotografias da face do inserto usado na ferramenta de diâmetro 20 mm. Fonte: elaboração própria.

### Ferramenta de 10 mm

Nas figuras E.5 e E.6 são apresentadas as fotografias do flanco principal, da face e dos gumes de um dos inserts utilizados na ferramenta de 10 mm para a usinagem da cavidade.

Com relação aos inserts usados na ferramenta de diâmetro 10 mm, deve-se mencionar que a sua geometria é diferente em comparação com as outras ferramentas. Esses inserts apresentam microlascamentos, os quais ocorrem em ambos os inserts a uma distância de 500 $\mu$ m da extremidade da ferramenta (que corresponde à profundidade de corte utilizada de 0,5mm), enquanto há outros que aconteceram em uma altura maior. Os microlascamentos que estão mais distantes da extremidade da ferramenta podem ter ocorrido durante o contato com a parede da cavidade e possivelmente com o material não removido nos níveis z usinados anteriormente. Esses microlascamentos são mais evidentes no inserto utilizado na trajetória gerada pelo software NX.

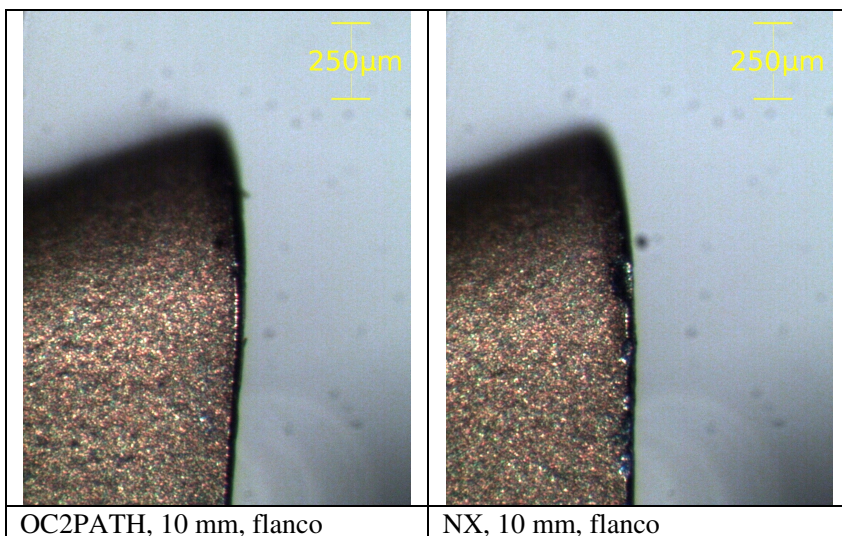
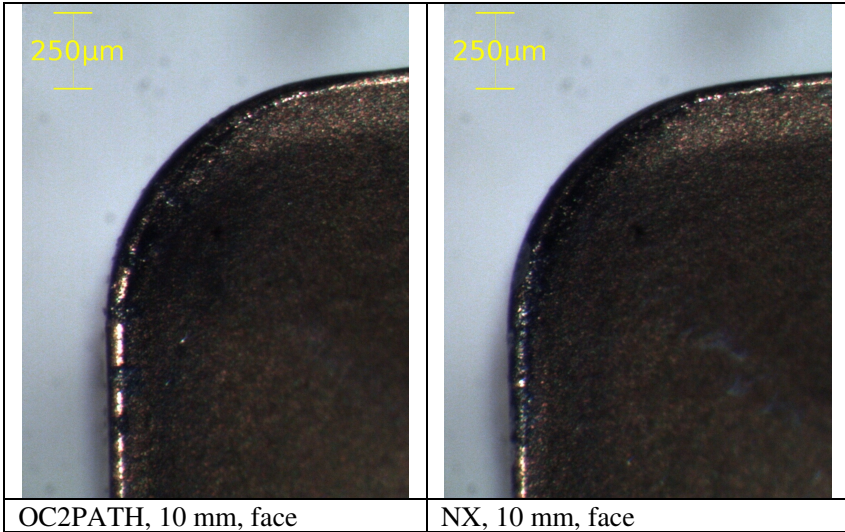


Figura E.5. Fotografias do flanco principal do inserto usado na ferramenta de diâmetro 10 mm. Fonte: elaboração própria.



OC2PATH, 10 mm, face

NX, 10 mm, face

Figura E.6. Fotografias da face do inserto usado na ferramenta de diâmetro 10 mm. Fonte: elaboração própria.